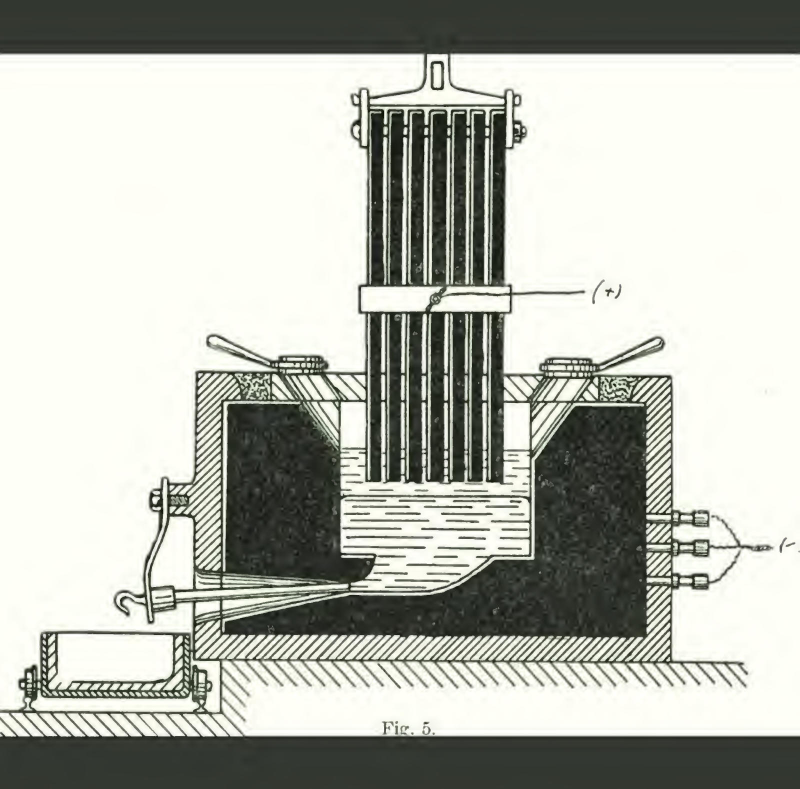


Fig. 5.

Entwicklung, Bau und Betrieb der elektrischen Öfen zur ...

Wilhelm Borchers



Encyklopädie

der

Elektrochemie.

IX. Band.

Entwicklung, Bau und Betrieb

der

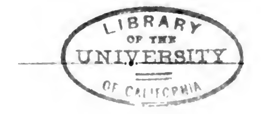
Elektrischen Öfen

zur

Gewinnung von Metallen, Carbiden
und anderen metallurgisch wichtigen Produkten.

Von

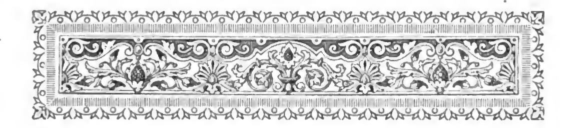
Dr. W. Borchers,
Lehrer a. d. Königl. Maschinenbau- und Hüttenschule
in Duisburg.



Halle a. S.
Verlag von Wilhelm Knapp.
1897.

Inhaltsverzeichnis.

*) Bei der Gleichartigkeit des Stoffes konnte von einem Sachregister abgesehen werden.





Wenn ich auch in der zweiten Auflage meiner Elektrometallurgie auf eine grosse Anzahl elektrischer Erhitzungsapparate einzugehen Gelegenheit genommen und auch in den beiden bis jetzt erschienenen Bänden des gemeinschaftlich mit Herrn Prof. Nernst herausgegebenen Jahrbuches der Elektrochemie über die neueren Ofenformen berichtet habe, so mag es doch nicht überflüssig sein, die für metallurgische Zwecke bisher nutzbar gemachten elektrothermischen Methoden und Vorrichtungen bezüglich ihres Ursprunges, ihrer Entwicklung, ihrer Verwendbarkeit und ihrer Konstruktionsbedingungen im Zusammenhange einer kurzen Untersuchung zu würdigen. Sie haben bereits grosse Aufgaben gelöst und sind dazu berufen, uns noch weitere wichtige Aufschlüsse über die Chemie der hohen Temperaturen zu liefern. Keine andere Erhitzungsmethode ermöglicht uns die Erreichung auch nur annähernd gleicher Wärmegrade, keine andere Erhitzungsmethode gestattet die Konzentration fast beliebig grosser Wärmemengen auf einen beliebig kleinen Raum, und keine andere Erhitzungsmethode macht uns so unabhängig von den Einflüssen des Ofenbaumateriales, der Feuergase und anderer Schwächen der eigentlichen Feuerungstechnik: Wir können jetzt unsere Öfen aus demselben Stoffe aufbauen, den wir zu schmelzen, zu rösten oder sonstwie zu verändern beabsichtigen; wir können in jeder Atmo-

sphäre arbeiten; wir können also jede Verunreinigung von dem zu gewinnenden Produkte fern halten; wir können unter Wasser die feuerbeständigsten Metalle und Erze schmelzen; wir können an beliebigen Stellen eines Apparates die grössten Temperaturdifferenzen hervorrufen; kurz wir müssen heute im stande sein, jede Aufgabe, welche die Erhitzungstechnik auch stellen mag, zu lösen.

Die Erhitzungsarten.

Allen Arbeitsbedingungen nach müssen wir die Erhitzung einfacher oder elektrolytischer Leiter durch Ströme unnormaler Dichte wohl unterscheiden von der Erhitzung durch den Lichtbogen. Gegenüber der Lichtbogen-Erhitzung mag es gestattet sein, die erste Art als Widerstands-Erhitzung zu bezeichnen, was hoffentlich nicht zu Missverständnissen Veranlassung giebt, obwohl ja bei der Lichtbogenbildung auch ein Widerstand überwunden wird. Beide Methoden lassen sich kurz dahin charakterisieren, dass bei gleicher Entfernung der Enden (Pole) der Hauptleitung die **Widerstands-Erhitzung** mit niedrigen Spannungen aber grossen Stromstärken, die **Lichtbogen-Erhitzung** dagegen mit hohen Spannungen und geringen Stromstärken durchzuführen ist. Mit Rücksicht auf die besondere Ausführung jeder dieser Methoden unterscheiden wir, wie ich auch schon in oben erwähntem Jahrbuche ausführte:

I. Widerstands-Erhitzung.

1. Die zu erhitzende Substanz ist selbst als Leitungswiderstand in einen Stromkreis eingeschaltet.
2. Die zu erhitzende Substanz befindet sich mit einem elektrisch erhitzten Widerstande in Berührung.

II. Lichtbogen-Erhitzung.

1. Die zu erhitzende Substanz bildet einen oder beide Pole eines Lichtbogens.
2. Die zu erhitzende Substanz befindet sich in einem durch Lichtbogen erhitzten Raume.

I. Widerstands-Erhitzung.

1. Die zu erhitzende Substanz als Leitungswiderstand in einem Stromkreise.

Von dieser Art der elektrischen Erhitzung wurde für metallurgische Zwecke, wenn auch nur versuchsweise, zuerst Anwendung gemacht; denn schon das Jahr 1815 bringt uns die Beschreibung eines interessanten Versuches, den wir als elektrisches Cementieren bezeichnen können: ein als Widerstand in einen Stromkreis eingeschalteter und mit Diamantpulver in Berührung befindlicher Eisendraht wurde bei der elektrischen Erhitzung in Stahl verwandelt. Nach den Londoner Philosophical Transactions vom Jahre 1815 (Bd. 15, S. 370) führte



Fig. 1.

Pepys diesen Versuch in folgender Weise aus: Er bog einen Draht aus reinem, weichem Eisen zu einem Winkel und durchschnitt denselben von der Biegung aus der Länge nach mittels einer feinen Säge. In den so gebildeten Spalt streute er Diamantstaub, welchen er durch feinere Drähte am Herausfallen hinderte. Der Teil des Drahtes, welcher den Diamantstaub enthielt, wurde noch in Talkblätter eingewickelt. So vorbereitet wurde der Draht in den Stromkreis einer Batterie eingeschaltet, wo



er sehr bald rotglühend wurde und 6 Minuten dieser Temperatur ausgesetzt blieb. Beim Öffnen des Drahtes fand Pepys, dass der Diamantstaub verschwunden, und dass der Teil des Drahtes, in welchem derselbe eingeschlossen war, sich vollständig in Stahl verwandelt hatte. (Fig. 1.)

Nähere Angaben über Drahtstärke, Stromdichte u. dgl. enthielt die Mitteilung nicht, sie besitzt aber doch ausser dem historischen insofern noch praktisches Interesse, als sie uns zeigt, dass das Cementieren von mit kohlenstoffhaltigem Material in Berührung befindlichen und durch einen dichten Strom erhitzten Eisenstäben schon vor 80 Jahren ausgeführt wurde.

Während der späteren Entwicklung der Elektrotechnik schenkte man dieser Art von Erhitzungsmethoden anfangs wenig Aufmerksamkeit; denn erst vor etwa 12 Jahren wurden durch Patentschriften und auf Gewerbeausstellungen wieder Apparate bekannt, welche dieses Prinzip für metallurgische Zwecke zu verwerten suchten; dann aber fand dasselbe allgemeinste Anerkennung und erzielte auf dem Gebiete der Metallgewinnung grossartige Erfolge.

Geringer waren die Erfolge auf dem Gebiete der Metallbearbeitung, für welches diese Erhitzungsmethode zum Schweissen, Schmelzen, Tempern, Ausglühen u. s. w. in zahlreichen Modifikationen in Vorschlag gebracht worden ist. Auf diese näher einzugehen muss ich mir mit Rücksicht auf den Zweck dieser Schrift, nur die für die Metallgewinnung und Metallraffination brauchbaren Ofenkonstruktionen zu analysieren, hier versagen.

Die Gebrüder Cowles (Cleveland, Ohio, U. S. A.) machten dieses Erhitzungsprinzip zuerst für die Metallgewinnung nutzbar.

Nach den ältesten Patentschriften derselben (angemeldet im Dezember des Jahres 1884) hoffte man in erster Linie die Reduktion von Zink- und von Aluminium-

oxyd durch Verwendung elektrisch erzeugter Wärme verbessern, bezw. durchführen zu können. In beiden Fällen sollte das mit leitfähigem, kohlenstoffhaltigem Materiale (Koks) gemischte Oxyd, wie die beiden folgenden schematischen Figuren 2 und 3 zeigen, als Widerstand zwischen die aus leitfähiger Kohle bestehenden Pole eines Stromkreises von hoher Dichte eingeschaltet werden.

Nach Fig. 2, welche den für die Zinkgewinnung bestimmten Ofen darstellt, bestand der das vordere Ende

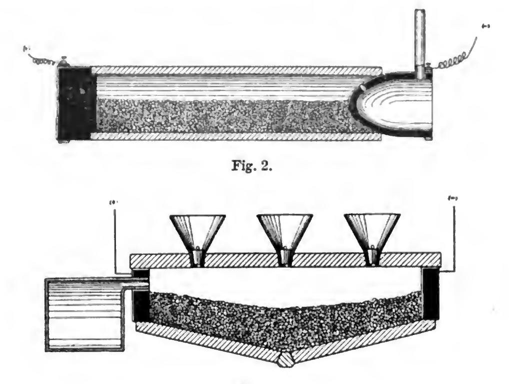


Fig. 2.

Fig. 3.

einer aus nicht leitendem Materiale angefertigten Retorte schliessende Pol aus einem gelochten Tiegel, durch den sowohl die Metalldämpfe, wie etwa gebildetes Kohlenoxyd entweichen konnten. Der entgegengesetzte Pol, ein Kohleblock, schloss das andere Retortenende.

Fig. 3 zeigt in ganz schematischer Darstellung einen Ofen, in welchem sich innerhalb der Erhitzungskammer flüssige Massen ansammeln konnten. Der durch den linken Pol hindurch mit dem Ofen in Verbindung stehende Raum soll eine Flugstaubkammer darstellen, durch welche

die gasförmigen Produkte des Schmelzprozesses abziehen sollten. Auch hier liegt die schlecht leitende Beschickung, Aluminiumoxyd mit reduzierenden und den etwa für die Herstellung von Legierungen erforderlichen Zuschlägen (Kupfer, Eisen), als Widerstand zwischen den Polen der Stromleitung. Die Ergänzung der Beschickung sollte, damit der Betrieb ein dauernder würde, durch Trichter im Ofendeckel erfolgen.

Für Zink-Retorten hat sich die elektrische Erhitzung nicht bewährt. Die erste Ofenkonstruktion (Fig. 2) ist

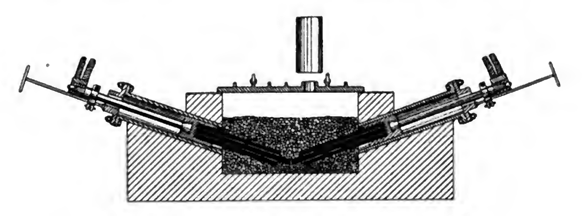


Fig. 4.

daher nicht weiter ausgebildet worden. Die Herstellung von Aluminiumlegierungen fand aber eine Zeitlang Eingang in den Grossbetrieb. Wie sich hier der Ofen weiter entwickelt hat, zeigt uns Fig. 4. Den Schmelzraum bildet eine aus feuerfesten Steinen aufgemauerte Grube. In zwei einander gegenüberliegende Wände sind zur Einführung der Leitungspole weite Gusseisenrohre eingesetzt. Die Pole selbst bestehen aus Kohlestabbündeln, welche nebst einer zu ihrer Führung und zur Verbindung mit der Stromleitung dienenden Stange in einen Kupfer- oder Eisenblock eingegossen sind. Zum Vorbewegen und Zurückziehen der Pole dienen mit Handrad versehene Schraubenspindeln, deren Schraubenmuttern in Kragen liegen, die auf die Polführungsstangen ausserhalb der Rohrverschlussbüchsen aufgeschraubt sind. Auf die konisch

abgedrehten Enden passen konisch ausgedrehte, an den Stromleitungskabeln hängende bronzene Verbindungsblöcke. Ein durchlochter Eisendeckel schliesst den Ofen. Während des Betriebes zieht man ein Gasableitungsrohr soweit auf die Deckelöffnung herab, dass noch Luft genug zur Verbrennung des entweichenden Kohlenoxydes Zutritt findet. Bei der in Fig. 4 gezeichneten Stellung der Pole berühren sich zwei aus dem Kohlestabbündel hervorragende Kohlestäbe. Diese erhitzen sich zunächst schnell und sehr hoch, werden aber auch schnell abgenutzt. Inzwischen ist die in der nächsten Umgebung der Kohlebündel befindliche Beschickung selbst soweit leitend geworden, dass sie sich beim allmählichen Zurückziehen der Pole als Widerstand in den Stromkreis einschaltet.*) Unter steter Aufrechterhaltung einer passenden Entfernung der Pole, die nach den Schwankungen der Messinstrumente geregelt wird, erhitzt man so lange, bis der grösste Teil der Beschickung verschmolzen ist, schaltet den Ofen aus und setzt den nächsten in Betrieb. Nach dem Erkalten räumt man die Öfen der Reihe nach wieder aus, um sie ebenso wieder zu füllen und in Betrieb zu setzen.

Die Erhitzung kann mit Gleichstrom oder Wechselstrom ausgeführt werden; sie ist im letzteren Falle am gleichmässigsten. Der Umstand, dass bei Wechselstromerhitzung gerade so viel Aluminium reduziert wird, wie bei der Gleichstromerhitzung, beweist schon, dass eine Elektrolyse hier vollständig ausgeschlossen ist. Das Cowles-Verfahren ist, wie ich schon mehrfach betont

---

*) In dem aus Aluminiumoxyd, Holzkohle (oder Koks) und Kupfer (bezw. Eisen) bestehenden Beschickungsgemische geht der Kohlenstoff gleich beim ersten Erhitzen zum Teil in den graphitischen Zustand über, ein Teil des Oxydes wird zu Metall, bezw. Metallcarbid reduziert, kurz es bilden sich genug mehr oder weniger gut leitfähige Stoffe, um die Stromleitung mit zur Wärmebildung genügendem Widerstande selbst zu übernehmen.

habe, nur ein Reduktionsvorgang, bei welchem das Reduktionsmittel und später auch Teile der Beschickung elektrisch erhitzt werden. Ich komme später noch auf diesen Punkt, sowie auf Näheres über Betriebs- und Konstruktionsbedingungen zurück. Vorerst wird es zweckmässig sein, dem Cowles-Ofen den Héroult-Ofen gegenüberzustellen.

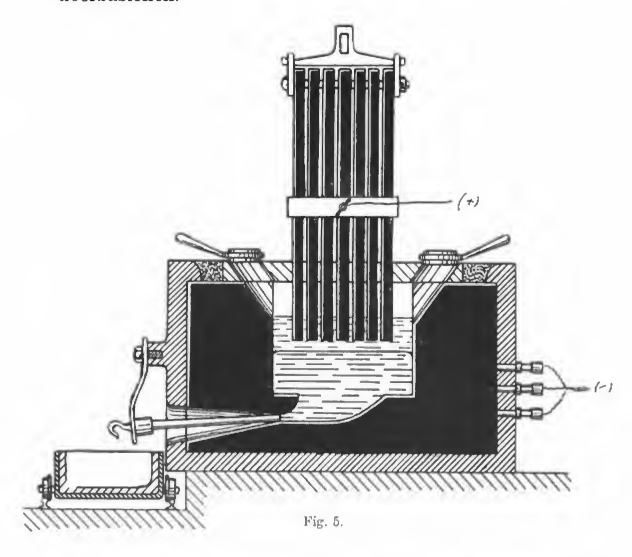


Fig. 5.

Auch in dem Héroult-Ofen wird ein zwischen zwei einfache Leiter eingeschalteter Widerstand erhitzt — und insofern stimmen beide Verfahren überein —; aber der Widerstand im Héroult-Ofen ist ein Elektrolyt — und darin liegt ein ganz wesentlicher Unterschied beider Verfahren. Cowles reduziert Aluminiumoxyd durch elektrisch erhitzten Kohlenstoff; Héroult elektrolysiert geschmolzenes

Aluminiumoxyd mit sehr dichten Strömen, die neben der elektrolytischen auch Wärmewirkung ausüben.

Fig. 5 zeigt die schematische Darstellung des ursprünglichen Héroult-Ofens, der ja aus zahlreichen Veröffentlichungen schon allgemein bekannt geworden ist. Die Kohleauskleidung eines eisernen Schmelzgefässes mit dem zu Beginn des Betriebes einzuschmelzenden Metalle bilden die Kathode in einer Schmelze von Aluminiumoxyd und Flussmitteln; ein Block von Kohleplatten, der durch einen mit Beschickungs- und Gasabführungsöffnungen versehenen Deckel in die Schmelze eintauchte, bildete die Anode. Man musste das sich abscheidende Aluminium in Kupfer auffangen, das zu Beginn des Betriebes elektrisch eingeschmolzen wurde, weil das aus dem ebenfalls elektrisch eingeschmolzenen Oxyde sich ausscheidende Aluminium ohne Kupfer durch Kohlenstoff verunreinigt und entwertet worden wäre. Anfangs lieferte die Aluminium-Industrie-A.-G., welche nach diesem Verfahren arbeitet, daher nur Aluminiumbronze, bis später dem damaligen Direktor dieser Gesellschaft, Herrn Dr. Kiliani, wahrscheinlich durch Veränderung der Ofenauskleidung und der Stromzuführung zur Kathode, sowie durch Benutzung leicht schmelzbarer Beschickung, die Reindarstellung des Aluminiums gelang. Begreiflicherweise wird von Seiten der Fabrikanten über diese Punkte nichts in die Öffentlichkeit gebracht.

Meine eigenen Versuche führten mich zur Konstruktion des in Fig. 6 dargestellten Ofens, der, wie man sieht, im Prinzip dem Héroult-Ofen gleich ist, sich von diesem aber in folgenden Punkten unterscheidet: 1. die Ofenausfütterung besteht aus Aluminiumoxyd, Flussspat oder Kryolith; sie wird, wo die Luftkühlung durch die dünnen Blechwände des Tiegels nicht genügt, das Fortschmelzen derselben zu hindern, durch um den Tiegel gelegte Wasser- oder Kaltluft-Leitungen gekühlt. 2. Die

Kathode besteht aus einer kühlbaren Stahlplatte. In dieselbe ist ein Kupferrohr eingeschraubt, durch welches mit Hilfe von Wasser oder kalter Luft eine zur Verhinderung der Auflösung des Eisens ausreichende Kühlung

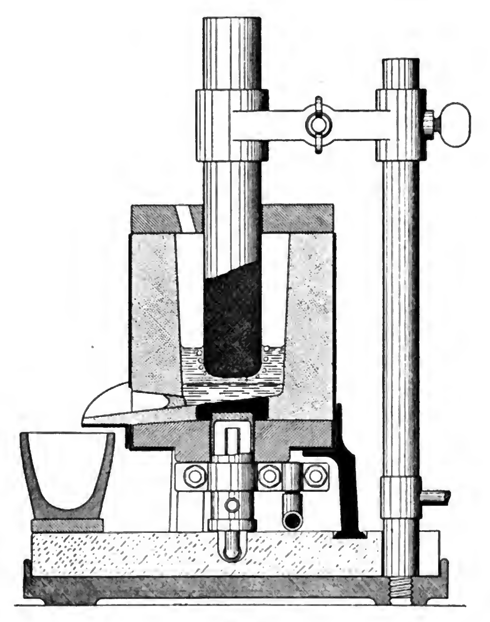
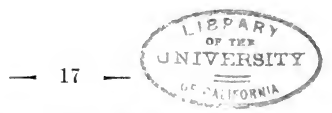


Fig. 6.

herbeigeführt wird, durch welches aber auch gleichzeitig die Verbindung mit der Stromleitung vermittelt wird. Der Betrieb dieses Ofens ist derselbe wie mit dem Héroult-Ofen, nur mit dem Unterschiede, dass kein Kupfer eingeschmolzen wird und dass man mit einem möglichst leicht schmelzbaren Flussmittel aus Haloidsalzen der



Alkali-, Erdalkalimetalle und des Aluminiums selbst arbeitet, in welchem das Aluminiumoxyd gelöst wird.

Fig. 7.

Das Oxyd wird in dem Masse, wie es verbraucht wird, durch Nachfüllen wieder ersetzt; das am Boden des

Gefässes sich ausscheidende Metall sticht man von Zeit zu Zeit ab.

Ähnliche Grundsätze, wie bei diesem Ofen, sind auch von Urbanitzki für seine letzte Konstruktion gewählt. Wir finden hier den gekühlten Boden wieder, und als

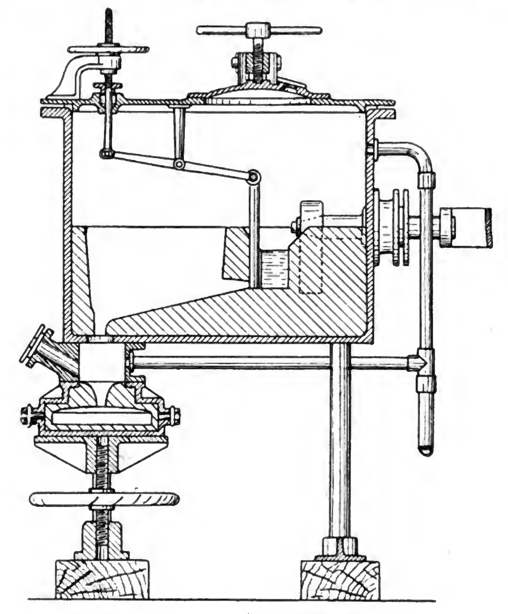


Fig. 8.

Neuerungen einen gekühlten Deckel und die ringförmige Anodenanordnung, um centrale Beschickung zu ermöglichen (s. Fig. 7). Der Ofen ist sowohl für Widerstands- wie für Lichtbogen-Erhitzung verwendbar.

Noch mag Taussig's Ofen, der an Stelle des Siemensschen Regenerativ-Gas-Ofens zur Ausführung des Martin-

Prozesses in Vorschlag gebracht wird, hier erwähnt sein. Fig. 8 stellt einen Vertikalquerschnitt des Ofens dar, während Fig. 9 nur den wesentlichsten Teil desselben, den (schwarz gefärbten) Erhitzungswiderstand mit seinen Anschlüssen an die Leitung zeigt. Der Erhitzungswiderstand wird hier durch das zu schmelzende und zu raffinierende Metall nebst etwaigen Zuschlägen (Schrott, Magneteisenstein u. s. w.) gebildet. Wie die Skizze zeigt, ist der geschlossene Schmelzraum mit Rohrleitungen versehen, die das Arbeiten in beliebiger Atmosphäre unter Druck oder im Vakuum gestatten.

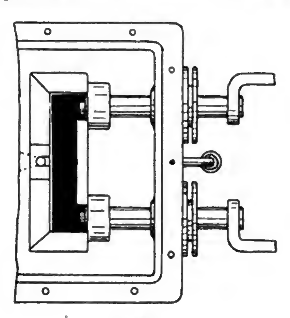


Fig. 9.

Auch ist links von der Schmelzrinne ein Sammelraum für fertiges Schmelzgut vorgesehen, wenn vom Ofen aus direkt grössere Gussstücke hergestellt werden sollen. Eine Gussform ist ausserdem in Fig. 8 unter dem Schmelzraume angedeutet. — Mit geringen Änderungen lässt sich der Ofen auch für andere Schmelzarbeiten mit Dauerbetrieb verwenden. Ob er den Siemens-Ofen für den Martin-Prozess verdrängen wird, scheint vorläufig zweifelhaft.

Mag die oben gegebene kurze Übersicht über die Erhitzungsvorrichtungen dieser Klasse zunächst genügen. Auf die Verwendungsarten und Konstruktionsbedingungen derselben komme ich noch zurück, kann jedoch in diese

Erörterung gleich die folgende Ofenklasse mit hineinziehen und gehe daher vorläufig zu dieser über.

2. Die zu erhitzende Substanz in Berührung mit einem elektrisch erhitzten Widerstande.

Betrachten wir den in Fig. 1 dargestellten Ofen von dem Gesichtspunkte aus, dass es in erster Linie darauf ankam, das Verhalten des in den Drahtspalt eingeschlossenen Diamantpulvers während des Erhitzens zu prüfen, so können wir ihn auch als Urtypus für diese Art von Erhitzungsvorrichtungen in Anspruch nehmen, denn direkt wurde dort der Eisendraht durch den Strom erhitzt.

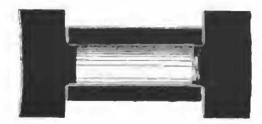


Fig. 10.

Als zweiter Versuch in dieser Richtung wäre dann der kleine Ofen von Depretz aus dem Jahre 1849 zu verzeichnen; er ist in Fig. 10 in natürlicher Grösse abgebildet. Nach seinem Berichte in Comptes rendus Bd. 29 vom Jahre 1849 bestand hier der Erhitzungswiderstand aus einem 7 mm weiten und 23 mm langen Rohre aus Zuckerkohle, welches mit Hilfe von zwei Stöpseln aus demselben Materiale verschlossen und in einen kräftigen Stromkreis eingeschaltet wurde. Die zu erhitzende Substanz befand sich innerhalb des Rohres.

Auch die letzte Ausführungsform des Cowles'schen Ofens, die wir in Fig. 4 dargestellt haben, würde zu Beginn des Betriebes dieser zweiten Ofenklasse zugehören, da es in den ersten Augenblicken das aus dem Kohlenbündel hervorragende Kohlenstabpaar ist, welches als Widerstand erhitzt wird. Erst nachdem in der Beschickung

hinreichende Mengen leitfähigen Materiales entstanden sind, bildet dieses selbst den Erhitzungswiderstand.

Im Jahre 1891 endlich veröffentlichte ich Beschreibung und Skizze eines Versuchsofens, der ausschliesslich nach dem Prinzip unsrer zweiten Ofenart arbeitet. Die Konstruktion ist die aus mehrfachen Veröffentlichungen bereits allgemeiner bekannte: Zwischen die aus zwei dicken Kohlenstäben gebildeten Pole einer Leitung ist innerhalb einer aus feuerfesten Steinen gebildeten Heizkammer ein dünner Kohlestab eingespannt (Fig. 11). Um den letzteren herum packt man die Beschickung, die von

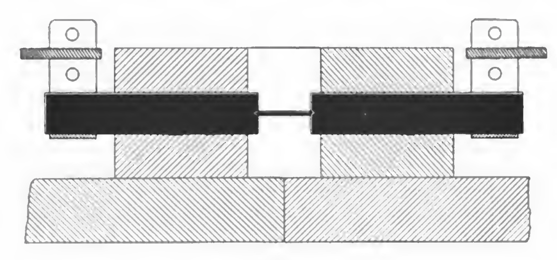


Fig. 11.

Innen aus durch den sich stark erhitzenden dünnen Kohlestab erwärmt wird. Schon in meiner ersten Veröffentlichung über diesen Gegenstand, in der ersten Auflage meiner Elektrometallurgie, machte ich die Mitteilung, dass sich mit Hilfe dieser Erhitzungsvorrichtung sämtliche bis dahin für unreduzierbar gehaltene Oxyde durch so erhitzten Kohlenstoff reduzieren lassen. Speziell erwähnte ich damals die Reduzierbarkeit des Siliciumdioxydes, sowie die Thatsache, dass eine Aufnahme von Kohlenstoff durch die Reduktionsprodukte (soweit sie sich mit Kohlenstoff verbinden oder legieren) nicht zu vermeiden sei (daher die Unbrauchbarkeit dieses Apparates für die Her-

stellung von Rein-Aluminium und anderen dem Kohlenstoffe gegenüber ähnlich sich verhaltenden Metallen, aber die Verwendbarkeit desselben für die Carbid-Gewinnung).

Schon in Patentanmeldungen aus dem Jahre 1892 (Acheson, Carborund) finden wir diese Ofenform getreu nachgebildet als Erfindung wieder, die sich bis zum Jahre 1895 zu der im D. R. P. Nr. 85 197 patentierten Konstruktion vervollkommnet hat. Die Ähnlichkeit dieser Öfen (s. Fig. 11 und 12) liegt klar auf der Hand. In dem letzteren bestehen die Kohlepole aus Bündeln von Stäben, welche, in eine Metallplatte eingefügt, in die Hauptleitung

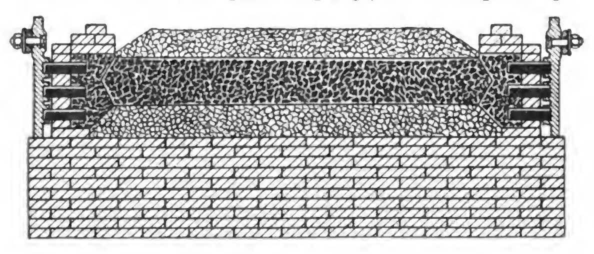


Fig. 12.

eingeschaltet sind. Den Erhitzungswiderstand bildet ein in die Beschickung eingestampfter Kern von Kokspulver, der sich in nächster Nähe der Pole zur Schonung der Polstäbe beträchtlich erweitert. Die Grundmauern und die die Pole haltenden Vorder- und Rückwände des Ofens sind in Mörtel aufgeführt, während die in der Skizze nicht gezeichneten Seitenwände desselben beim jedesmaligen Beschicken desselben aus trocken zusammengelegten Steinen aufgeführt werden, genau wie mein ganzer Versuchsofen aus einigen Steinen zusammengelegt wird.

Noch ein Vertreter dieser Gruppe findet sich in Hasslacher's Ofen zur Überführung von Schmirgel in Korund (D. R. P. Nr. 85 021), ebenfalls aus dem Jahre 1895. Er

will den Betrieb dadurch zu einem ununterbrochenen machen, dass er eine im Boden frei gelassene Öffnung mit einer Glasplatte bedeckt. Diese schmilzt nach einiger Zeit durch, der Ofen entleert sich, verschliesst sich unten wieder mit erkaltender Schlacke, sobald die kalte frische Beschickung aufgegeben wird, um dann von Zeit zu Zeit

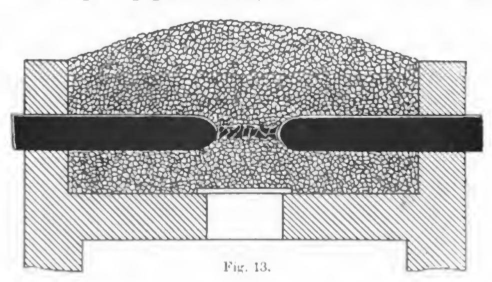


Fig. 13.

dieses Spiel zu wiederholen. (Fig. 13.) Es wird sich ein Vergleich dieses Ofens mit dem in Fig. 3 dargestellten Cowles-Ofen empfehlen.

Bei der Einleitung des Betriebes eines sehr einfachen Schmelzapparates von King und Wyatt (U. S. A. P. Nr. 562 402, 1896) ist dasselbe Erhitzungsprinzip gewählt worden. Den Schmelzofen bildet ein Haufen der Beschickung, als Erhitzungswiderstand dient ein senkrecht durch die Beschickung geführter, zwischen dicke Kohle gespannter dünner Kohlestab. (Fig. 14.)

Schliesslich mag auch noch de Laval's Ofen (D. R. P. Nr. 80 462) Erwähnung finden. Er ist zum raffinierenden Verschmelzen von Metallen (besonders Eisen) in Vorschlag gebracht worden. Der Schmelzraum eines niedrigen Schachtofens ist durch eine mitten liegende, nach Art der Feuerbrücken von Flammöfen durch einen Wasserkörper gekühlte Scheidewand aus nicht leitendem Materiale in zwei Teile geteilt. In jeder der so entstandenen schmalen

Vertiefungen liegen die (in Fig. 15 schwarz gefärbten) Verbindungsstäbe des Elektrolyten mit der Stromleitung. Über denselben sammelt sich das zu raffinierende Material geschmolzen an, während den eigentlichen Erhitzungswiderstand ein Oxyd, Salz oder eine andere geeignete schmelzbare Substanz bildet. Für Eisen wurde Eisenoxyduloxyd

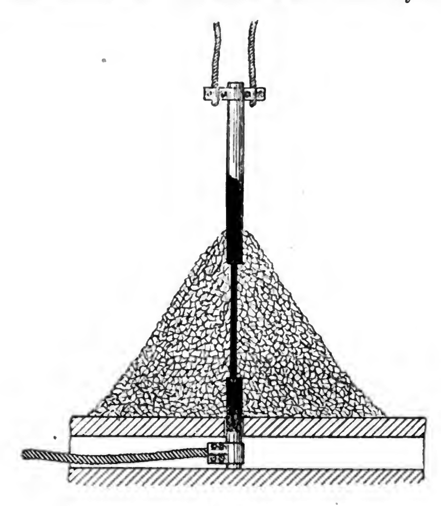


Fig. 14.

vorgeschlagen. Das aus Erzen unterhalb seines Schmelzpunktes reduzierte Metall wird durch eine im Deckel des Ofens befindliche Öffnung in die Schmelze geworfen, von welcher wie beim Siemens-Martin-Prozesse eine raffinierende Wirkung erwartet wird und in welcher das reine Metall zusammenschmilzt. Zur Vermeidung hier nicht beabsichtigter elektrolytischer Wirkungen wird zur Erhitzung Wechselstrom empfohlen. Zum Abfluss des Metalles und zur Regelung des Gesamtflüssigkeitsstandes

dienen die sogenannten Syphonstiche in den Seitenwänden des Ofens, während für den Abfluss der sich allmählich

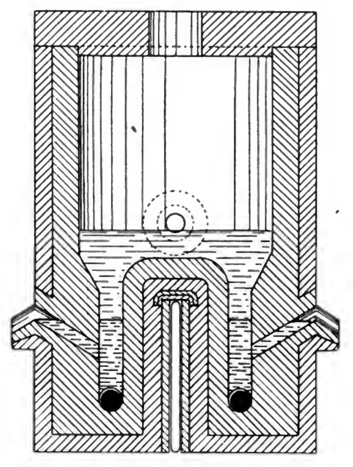


Fig. 15.

verunreinigenden Widerstands-Schmelze und zur Regelung ihrer Höhe über der Brücke eine Schlackenform in der Höhe des Flüssigkeitsspiegels vorgesehen ist.

Wenn ich nun noch einen Röstofen von Crompton und Dowsing der Vollständigkeit halber hier beifüge, so mag damit die Reihe der typischen Beispiele für die Entwicklung der Öfen mit festen oder flüssigen Erhitzungswiderständen erschöpft sein. Dieser Ofen kennzeichnet sich durch eine kleine Abweichung von den soeben berücksichtigten Konstruktionen: Der Erhitzungswiderstand ist in ein wärmespeicherungsfähiges Material (Chamotteplatten) eingelegt, befindet sich also nicht unmittelbar mit der zu erhitzenden Substanz in Berührung — ein Grund-

satz, welchen wir in allen denjenigen Apparaten wiederfinden, welche die Erzeugung gleichmässiger, weniger hoher Temperaturen bezwecken. Wie Fig. 16 zeigt, führen ein Trichter und ein mit Transportschnecke versehenes Gerinne einem Schachtofen das Röstgut zu. Letzteres gleitet über geneigt liegende Platten, in welche die Er-

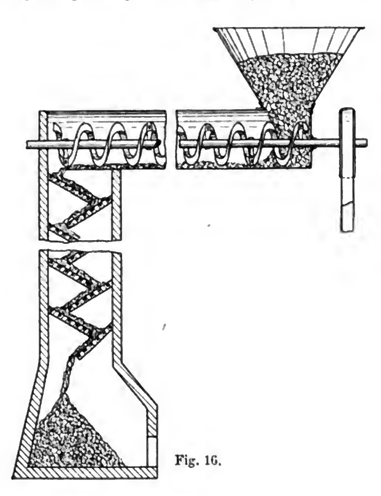


Fig. 16.

hitzungswiderstände eingelagert sind, nach abwärts in einen Sammelraum, aus dem es nach erfolgter Abkühlung ausgezogen wird. Auf diesem Wege wird es auf die gewünschte Rösttemperatur gebracht, bezw. auf dieser erhalten.

Wie wir aus dieser kurzen Übersicht entnehmen können, spielt in allen den unter I, 1 und I, 2 genannten Öfen, ausgenommen die Öfen des Héroult-Prinzipes und des zuletzt erwähnten Röstofens, die Beschickungskohle oder ein in die Beschickungskohle eingelegter Kohlekern

bezüglich der Wärmeerzeugung die wichtigste Rolle. Es wäre also in erster Linie die Frage zu erledigen, in welcher Form der hier erforderliche Kohlenstoff benutzt werden kann, welche Dimensionen man für die Kohlekörper zu wählen hat und wie hoch sich der Kraftaufwand stellt. Es ist natürlich fast unmöglich, alles, was leitfähigen Kohlenstoff enthält, auf seine Verwendbarkeit für diesen Zweck zu untersuchen und Vorschriften für die besonderen Fälle aufzustellen; wenn wir aber an den reinsten und dichtesten Kohlenstoffstäben, wie sie ja heute in vorzüglichen Qualitäten von vielen Fabrikanten geliefert werden, die obigen Fragen beantwortet haben, so ergeben sich daraus doch viele auch bei der Verwendung andren Materiales nützliche Anhaltspunkte. Ich habe in der folgenden Tabelle eine Reihe von Durchschnittsresultaten zahlreicher, während meiner Praxis ausgeführter Messungen mit den daraus zu ziehenden Schlüssen zusammengestellt. Bei diesen Versuchen waren Stäbe aus reinster, sehr aschenarmer, elektrisch ausgeglühter Kohle benutzt, so dass der Kohlenstoff derselben vom technischen Standpunkte aus für rein erklärt werden konnte. Die Spalten VII und VIII geben daher einige Anhaltspunkte über die zu verwendende Stromstärke und den zu erwartenden Kraftverbrauch bei Benutzung weniger dichten und weniger reinen kohlenstoffhaltigen Widerstandsmateriales, bezw. kohlenstoffhaltiger Mischungen. Es darf aber nicht übersehen werden, dass im Betriebe die Kohlenstoffmenge und die Leitungsfähigkeit der Beschickung mit jedem Augenblicke fortwährenden Schwankungen unterworfen sind, die in der Tabelle zusammengestellten Angaben haben also nur für Erhitzungen von kurzer Dauer annähernde Gültigkeit; bei Schmelzprozessen längerer Dauer geben sie nur Anhaltspunkte für die erste provisorische Zusammenstellung des Ofens. Genauere Bedingungen für spezielle Fälle lassen sich nur durch den Versuch er-

mitteln: die Rechnung wird uns hier stets im Stiche lassen.

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.
	Durchmesser in mm	Länge in mm	Gewicht von 10 mm Länge in g	Potential-Diff. auf 10 mm Länge in Volt	Stromdichte auf 1 qmm Querschnitt	Wattverbrauch auf 1 qmm Querschnitt u. 10 mm Länge	Auf jedes Gramm technisch reinen Kohlenstoffes in 10 mm Widerstandslänge	
							Stromstärke in Ampère	Watt-Verbrauch
a)	4	20	0,21	2,5	10	25,0	595	1487
b)	4	30	0,21	2,3	8	18,4	476	1095
c)	4	50	0,21	2,2	5	11,0	297	655
d)	4	100	0,21	2,0	3	6,0	178	357
e)	6	60	0,52	1,8	2,14	3.85	115	207
f)	6	200	0,52	0,85	1,43	1,21	77	65
g)	10	200	1,26	0,70	0,64	0,448	40	28
h)	10	300	1,26	0,47	0,57	0,268	34	16

Auf die Angaben in den Spalten VII und VIII muss ich noch einmal ganz besonders hinweisen, da meiner Ansicht nach für die metallurgische Erhitzungstechnik die Kenntnis der Stromdichte bezogen auf die Gewichtseinheit des in der Längeneinheit des Erhitzungswiderstandes enthaltenen leitfähigen Materiales, als welches ja meist Kohlenstoff in Betracht kommt, für den Grossbetrieb wichtiger ist, als die Kenntnis der Stromdichte bezogen auf die Flächeneinheit der als Widerstand gewählten Substanz. Bei leitfähigem, kohlenstoffhaltigem Materiale, wie z. B. Graphit, Retortenkohle, sogen. Elektrodenkohle und Koks, wird in dem Masse wie die Dimensionen der Apparate wachsen, die Möglichkeit der Verwendung zusammenhängender Kohlekörper immer geringer. Man muss schliesslich die Widerstandskohle, mag sie einen chemisch mitwirkenden Bestandteil der Beschickung bilden oder nicht, in Form mehr oder weniger grob gekörnter Massen verwenden, und diese entweder der Ofenbeschickung gleichmässig beimischen (vergl. die ersten Öfen der Gebr. Cow-

les) oder gesonderte quer durch die Beschickung gehende Erhitzungskerne in die Ofenbeschickung einstampfen. Wie verschieden nun ist die Dichte oben genannter Stoffe, wie verschieden selbst wird der Widerstand eines Heizkörpers z. B. sein, wenn bei gleichem Materiale die Körnung eine gröbere oder feinere war oder wenn selbst bei gleicher Körnung der Kern durch einen kräftigen oder weniger kräftigen Arbeiter eingestampft wurde. Da kann nur eine gleichzeitige Kontrolle durch Raummasse und Wage vor Störungen schützen; da genügt es nicht zu wissen, welchen Querschnitt der gewählte Widerstand hat; da muss der Betriebsführer auch die Gewissheit haben, dass in einer bestimmten Widerstandslänge auch ein bestimmtes Widerstandsgewicht vorhanden ist, denn danach muss er sich mit der Wahl der Stromstärke richten, will er Gewähr für die Erzielung einer gewünschten Temperatur haben.

Temperaturmessungen habe ich mit Rücksicht auf die verhältnismässig kleinen Apparate, mit denen ich gearbeitet habe, nicht ausführen können. Aus den folgenden Angaben lassen sich aber einige Schlüsse auf die Wärmeintensität ziehen. Bei Stromdichten von über 15 Ampère auf 1 qmm Kohlequerschnitt, also von mehr als 900 Ampère per Gramm in 1 cm Widerstandslänge enthaltenen Kohlenstoffes wurden sehr reine Kohlestäbe schwach biegsam und Kohlenstoff begann sich zu verflüchtigen.*) Es war hier also wohl eine in der Nähe von 3500° liegende Temperatur erreicht. Wie ich schon in der ersten Auflage meiner Elektrometallurgie mitteilte, giebt es kein Oxyd, das der bei einer Stromdichte von 10 Amp. per qmm Kohlestabquerschnitt erzielten Temperatur stand hielte;

---

*) Bei Glühlampenfäden sind merkwürdigerweise Stromdichten von 15 Amp. per qmm Fadenquerschnitt nichts Seltenes. Mehrere von mir untersuchte Fäden von Lampen, welche 0,60 bis 0,75 Amp. gebrauchten, zeigten Durchmesser von 0,25 mm, entsprechend einem Querschnitte von 0,05 qmm.

auch die hartnäckigsten werden hier durch Kohlenstoff reduziert.

Bei Stromdichten von 4 bis 5 Amp. per qmm Kohlequerschnitt (300 Amp. per Gramm Kohlenstoff in 1 cm Widerstand) kann man schon Kalk reduzieren. Auf der zweiten Jahresversammlung der Deutschen Elektrochemischen Gesellschaft habe ich vor den Augen des Hörerkreises mit Strömen von 50 bis 60 Amp. unter Benutzung 4 mm dicker Kohlewiderstände aus einer Kalk-Kohle-Mischung Calciumcarbid dargestellt. Es ist offenbar bei weitem nicht die Temperatur des Lichtbogens für diese Reaktion erforderlich.

Bei Stromdichten von etwa 0,5 Amp. per qmm Kohlequerschnitt (also 34 Amp. pro Gramm Kohlenstoff in 1 cm Widerstand) erreicht die Kohle kaum mehr Rotglut.

Ich brauche wohl kaum hinzuzufügen, dass die Arbeitsbedingungen dieser, wie der meisten Schmelzöfen mit der Grösse derselben günstigere werden. So arbeitete z. B. die Cowles Syndicate Company (England) mit 5 bis 6000 Amp. Da die mittleren aus dem Kohlebündel, Fig. 4, hervorragenden Stäbe zu Beginn des Betriebes die Erhitzungswiderstände bildeten und einen Durchmesser von 64 mm hatten, so kamen hier auf 3216 qmm Querschnitt höchstens 6000 Amp., also weniger als 2 Amp. per qmm, um die zur Aluminiumoxydreduktion erforderliche Temperatur hervorzurufen.

Zur Stromzuleitung zu den Kohlewiderständen oder zu der Beschickung benutzt man, wie die herangezogenen Beispiele zeigen, ausschliesslich aus gut leitfähiger Kohle hergestellte Stäbe, Stabbündel oder Platten, deren Querschnitt ich so bemesse, dass für je 1 Amp. Stromstärke 10 qmm Querschnitt vorhanden ist. Wie diese Kohlenkörper dann wieder in die Leitung einzuschalten sind, dafür geben ja auch die meisten der in vorstehendem schon kurz beschriebenen Abbildungen die nötige An-

weisung. Kleinere Kohlekörper werden unter Vermittlung von Schraubenklemmen an Draht-, Kabel-, Blechstreifen-Metallbandleitungen angeschlossen, während grössere Kohlekörper entweder von Schraubenklemmen gehalten werden oder durch Eingiessen der mit der Hauptleitung zu verbindenden Enden in nötigenfalls kühlbare Bronzekörper zum Einschalten in den Stromkreis vorbereitet werden. Dass die Kontaktflächen bei derartigen Verbindungen mindestens so gross gewählt werden müssen, wie der Leitungsquerschnitt des schlechter leitenden Materiales, bedarf wohl keiner näheren Begründung. Für dünnere Kupferleitungen rechne ich 2 Amp. auf den qmm Querschnitt, bei stärkeren, besonders in oder auf Holz gelegten Leitungen ist es ratsam, mit noch geringerer Stromdichte zu arbeiten; für eiserne Leitungen arbeite ich mit Stromdichten von höchstens $^1/_3$ Amp. per qmm Querschnitt und reduziere dieselben bei dicken nicht frei liegenden Leitungen auf $^1/_4$ Amp. per qmm. Nähere Angaben über die Anlage längerer Leitungen und deren Dimensionierung finden sich in Uppenborn's Elektrotechniker-Kalender und in Strecker's Hilfsbuche der Elektrotechnik.

Was nun schliesslich noch die nach dem Héroult'schen Prinzip, ohne Verwendung von Kohle oder ähnlichen Widerständen arbeitenden Öfen betrifft, so besteht ja, wie schon erwähnt, die abweichende Arbeitsweise dieser Apparate darin, dass man durch Aufwand hoher Stromdichten mit der Elektrolyse die erforderliche Erhitzung geschmolzener Elektrolyte vereinigt. Wir wissen ja, dass sich Elektrolyte so gut wie einfache Leiter stark erhitzen lassen, wenn wir die ihrer normalen Leitungskapazität entsprechende Stromdichte wesentlich überschreiten. Gewiss würde die Konstruktion geeigneter Schmelzöfen dieser Art sehr grosse Schwierigkeiten bereiten, müsste man den Widerstandsquerschnitt gegenüber dem Querschnitte der Leitungspole wie bei den meisten der soeben erörterten

Öfen verringern; glücklicherweise ist aber die Leitfähigkeit der für metallurgische Zwecke in Betracht kommenden geschmolzenen Elektrolyte eine hinreichend geringe und kann ausserdem durch Zusätze soweit herabgemindert werden, dass die gewünschte Erhitzung noch mit Stromdichten erreichbar ist, welche von den gegenüber andern einfachen Leitern verhältnismässig schlecht leitenden Kohlekörpern noch bequem gefördert werden können. Mit anderen Worten: Die Stromdichte in den für diese Arbeiten unbedingt notwendigen Kohlepolen darf grösser sein wie die Stromdichte des als Widerstand fungierenden Elektrolyten, der Querschnitt des Kohlepols also ein geringerer als der des Elektrolyten. Damit ist uns die Möglichkeit gegeben, dem Kohlepol in ein so weites Gefäss, also in eine so weite Flüssigkeitssäule einzuhängen, dass zwischen Kohle und Gefässwandung noch ausreichender Raum zum Beschicken und zum Entweichen sich entwickelnder Gase übrig bleibt, wie der in Fig. 6 dargestellte für die Aluminiumoxyd-Elektrolyse bestimmte kleine Ofen zeigt: Durchmesser des Kohlepoles 40 mm, also Querschnitt 1256 qmm; Stromstärke 100 bis 120 Ampère (kann bis 200 Amp. gesteigert werden), also Stromdichte im Kohlepol 1 Amp. auf 10 qmm Querschnitt. Durchmesser der Schmelze 70—75 mm, also Querschnitt derselben durchschnittlich 4000 qmm; bei obiger Stromstärke würde demnach im Elektrolyten (und da das unten im Gefässe abgeschiedene Metall die Kathode bildet, auch an der Kathode) eine Stromdichte von 1 Amp.: 40 qmm bis 3 Amp. auf 100 qmm Querschnitt (= 25 bis 30 000 Amp. per qm) herrschen.

Bei dieser Ofenkonstruktion wird uns der gekühlte Metallpol gegenüber dem Kohlepole auffallen. Hier speziell hat die Kühlung den Zweck, das am Boden sich ausscheidende Metall vor einer Verunreinigung durch die Substanz des Poles zu bewahren, bezw. die Auflösung

der letzteren zu verhindern, und den Gefässboden dicht zu halten. Es ist zu berücksichtigen,. dass die Kühlung nicht so weit getrieben wird, dass infolgedessen das sich ausscheidende Metall oder gar ein Teil der Schmelze erstarrt. Im letzteren Falle würde die Stromleitung sofort unterbrochen sein. Auch bei anderen der bisher besprochenen Ofenkonstruktionen würden hier und da gekühlte Metallpole die Stelle der Kohlepole einnehmen können, wo dies irgend welche Vorteile bieten sollte; so wären dieselben z. B. bei Taussig's Ofen eventuell am Platze, denn hier haben wir es mit einem Widerstande zu thun, der im kalten, wie im warmen Zustande leitet. Verschwindet aber, wie bei der Fabrikation von Metallcarbiden, der ursprünglich benutzte Kohlewiderstand, da er mit an der Reduktion teilnimmt oder sich mit den Metallen vereinigt, so sind gekühlte Metallpole vollständig ausgeschlossen, wenn in der Beschickung oder unter den Schmelzprodukten solche sind, die im kalten Zustande nicht leiten. Die dünnste Schlackenkruste, welche, aus der Schmelze erstarrend, sich auf einem solchen Pole ansetzt, unterbricht die Stromleitung.

Bei der Wahl des übrigen Ofenbaumateriales für elektrische Schmelzöfen dieser Art sowohl, wie sämtlicher elektrisch geheizter Öfen überhaupt, nahm man anfangs die Sache schwieriger als sie lag. Das feuerfesteste Material schien kaum geeignet, Temperaturen, wie sie auf elektrischem Wege erzielt werden konnten, zu ertragen, so lange man noch die elektrische Erhitzungstechnik mit dem Auge der alten Feuerungstechnik betrachtete. Es stellte sich aber heraus, dass die neue Heizmethode auch in dieser Hinsicht ungeahnte Erleichterungen mit sich brachte.

Vergegenwärtigen wir uns nur die Schwierigkeiten, welche der elektrolytischen Aluminiumgewinnung anfangs entgegenstanden, ehe man zur elektrischen Heizung schritt. Jedes Gefässmaterial erwies sich als unbrauchbar zum

Schmelzen des Elektrolyten mit aussen erzeugter Wärme, sei es, dass das Schmelzgefäss zerstört wurde oder sei es, dass der Elektrolyt und das zu gewinnende Metall unheilbar verunreinigt wurden.

Jetzt, wo die Wärmeerzeugung im Innern der zu erhitzenden Massen stattfindet, können wir das Schmelzgefäss aus derselben Substanz bilden, aus welcher der Elektrolyt, oder Teile der Ofenbeschickung bestehen, wenn wir denselben den nötigen Halt verleihen. Und diese Bedingung ist jetzt äussert leicht zu erfüllen, seitdem die Erhitzung von aussen fortfällt. Jedes beliebige Material von genügender Festigkeit ist brauchbar, einen Tiegel oder sonstiges Schmelzgefäss daraus herzustellen. Wollen wir das Metall X aus einer Verbindung desselben mit dem Metalloide oder Säureradikale Y durch Reduktion oder Elektrolyse bei hohen Temperaturen abscheiden, so füttern wir das Schmelzgefäss einfach mit der Verbindung XY aus; wir kühlen das Schmelzgefäss von aussen, während innen Temperaturen von 2—3000° herrschen und veranlassen so einen Teil der Verbindung XY an den Wandungen des Schmelzgefässes zu erstarren und innerhalb der äusseren Hülle ein zweites Gefäss zu bilden, das jedenfalls allen Anforderungen an die Reinhaltung des Elektrolyten und der Produkte der Elektrolyse entsprechen wird. Aber nicht nur das: Wir können in einer Schmelze an verschiedenen gar nicht weit von einander entfernten Stellen Temperaturen aufrecht erhalten, die um Hunderte von Graden von einander abweichen. Man denke sich in einem Gefässe eine dem Erstarren nahe Schmelze, innerhalb derselben eine der Anode gegenüber unverhältnismässig kleine Kathode, an welcher eine so grosse Stromdichte herrscht, dass dieser Pol weissglühend wird, während die ganze übrige Schmelze kaum rotglühend ist, und auch diese früher unmögliche Bedingung ist erfüllt. — Ohne Zweifel ist in dem Baumaterial für den elektrischen

Schmelzofen eine weit grössere Auswahl vorhanden als für die Öfen der Feuerungstechnik. Es giebt fast kein überhaupt für Apparatkonstruktionszwecke in Betracht kommendes Material, das geradezu auszuschliessen sein würde. Um das Beispiel auf die Spitze zu treiben, möchte ich behaupten, dass man einen Strohhut als Aussenwand eines elektrischen Schmelztiegels verwenden kann, in welchem man Temperaturen von über 3000° hält, ohne die Strohhülle auch nur zu versengen.

Ich bin mir wohl bewusst, zahlreiche Ofenformen dieser Klasse unerwähnt gelassen zu haben — habe ich doch selbst für die verschiedensten Versuchszwecke mehrere hier nicht aufgeführte Ofen und Öfchen konstruiert —, aber für den Zweck dieser Arbeit, die Entwicklung, Arbeits- und Konstruktionsbedingungen der Öfen dieses Erhitzungsprinzipes kurz zu kennzeichnen, werden die herangezogenen Beispiele doch wohl genügen.

Dem Metallurgen wird es mit einem Blicke auf die verschiedenen Skizzen auffallen, dass man mit der elektrisch erzeugten Wärme vielleicht verschwenderischer ist, als in einigen Fällen wenigstens nötig sein würde. Man lässt die mit den heissen Reaktionsgasen, wie Kohlenoxyd, abgehende Wärme und chemische Energie vorläufig ganz unberücksichtigt. Wenn wir nun wissen, bis zu welchem Grade der Vollkommenheit die bisherige Metallhütten-Technik die ihr verfügbare Wärme in ihren hohen Schachtöfen ausnutzt, so werden wir unter den bis jetzt bekannten elektrischen Öfen mit Widerstandserhitzung vergeblich nach dem elektrischen Schacht- oder Hochofen suchen. Die Möglichkeit der Konstruktion eines solchen Ofens ist doch gewiss nicht ausgeschlossen, und wohl einer Erörterung wert. Unter den bekannten Schachtofenformen würde sich z. B. der Rachette-Ofen sehr leicht für den elektrischen Betrieb umändern lassen. Bekanntlich bildet der Horizontalquerschnitt des Herdes eines solchen Ofens ein

schmales Rechteck, dessen Ecken beim Bau meist abgerundet werden, der langgestreckte schmale Körper der schmelzenden, bezw. geschmolzenen Massen im Gestell bezw. auf dem Herde dieses Ofens würde sich daher seiner Form nach sehr gut als Widerstandskörper eignen. In den nachstehenden Figuren 17, 18, 19, 20 habe ich daher einen für elektrischen Betrieb, sei es zur Herstel-

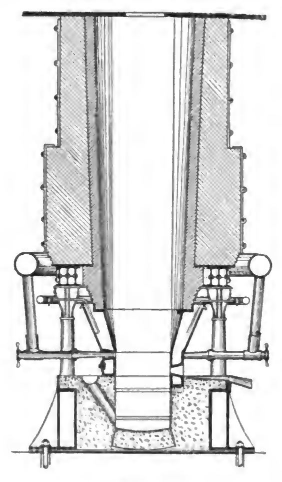


Fig. 17.

lung von Metallen, Legierungen, Carbiden oder dergl., umgeänderten Rachette-Ofen neuerer Konstruktion zur Darstellung gebracht, um wenigstens die Möglichkeit ihrer Ausführung zu zeigen. Wie schon gesagt, gebe ich hier nur eine Papierkonstruktion, in der Praxis ist dieselbe noch nicht verwirklicht. Ich habe, wie die Abbildungen zeigen, alle wesentlichen Schacht- und besonders Rachetteofen-Konstruktionsteile beibehalten, selbst aus gleich an-

zugebenden Gründen die Windleitung. Verändert hat sich nur der Herd. Fig. 18, halb Ansicht, halb Vertikalschnitt, sowie Fig. 19, Grundriss, veranschaulichen die Einführung

Fig. 18.

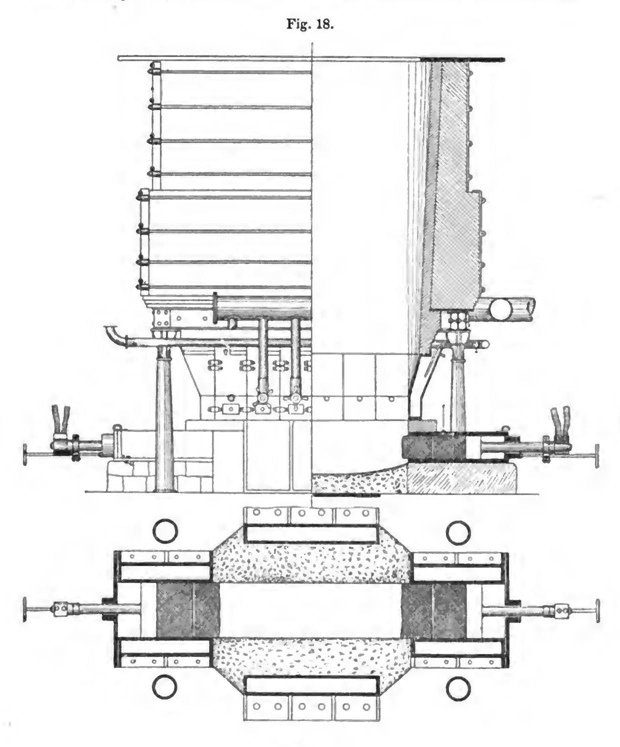


Fig. 19.

der hier als Kohleblöcke gedachten Pole in den Schmelzraum, sowie die Verbindung dieser Polblöcke mit der Hauptleitung. Die Leitungskabel werden mit Hilfe eines

passenden Formstückes auf das eine Ende einer dicken Kupferstange geschoben, deren anderes Ende in einen nötigenfalls kühlbar eingerichteten Kolben eingefügt ist. Mit Hilfe einer mit Handrad versehenen Schraube kann man den Kolben und damit die Kohleblöcke vorschieben. Ist einer der letzteren weggebrannt, so ist der Kolben an einer Stelle des eisernen Führungskastens angelangt, wo man zwischen den letzten Kohleblock und den Kolben einen Schieber niederlassen kann. Ist das geschehen, so zieht man den Kolben zurück, ebenso den vorderen Teil des den Führungskasten schliessenden Deckels, und kann nun einen neuen Kohleblock einlegen. Der Deckel wäre dann wieder zu schliessen, Kolben und Block vorzuschieben

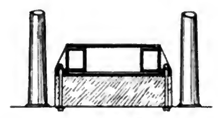


Fig. 20.

und der Schieber wieder zurückzuziehen. Der Betrieb brauchte also während des Einsetzens eines neuen Polstückes gar nicht unterbrochen zu werden; denn der Führungskasten für alle diese Polteile besteht ja aus Eisen, vermittelt also beim Zurückziehen des Kolbens die Stromzuführung. Aus Figuren 18, 19 und 20 ist sowohl die Einrichtung des Polführungskastens, wie der übrigen Herdteile ersichtlich. Den Herd würde man natürlich am zweckmässigsten aus demselben Oxyde herstellen, welches man zu reduzieren beabsichtigt, indem man gröbere Brocken, gemischt mit feinerem Pulver zwischen die aus Steinen und Eisenkörpern gebildeten Herdwandungen stampft. Die Seitenwandungen des Herdes und der Polführungskästen werden zur Schonung der Herdmasse und der Polkörper am besten durch kühlbare Eisenhohlkörper gebildet.

Entwickelt sich, was wohl in den meisten Fällen zutreffen wird, Kohlenoxyd aus der schmelzenden Beschickung, und gestattet es die Natur der noch ungeschmolzenen, in den oberen Ofenteilen niedergehenden Massen, so kann man durch Luftzuführung in die oberen Teile des Gestelles oder des Schachtes das Kohlenoxyd verbrennen und so die Beschickung vorwärmen. Ich habe deshalb in die Figuren 17 und 18 die sonst bei derartigen Öfen übliche Windleitung mit eingetragen, wie auch die übrigen Schachtofen-Konstruktionsteile beibehalten sind, z. B. die kühlbare Rast, der Arent'sche oder Syphonstich, die gekühlte Schlackenform u. s. w.

Das Einbringen der Beschickung würde wie bei jedem anderen modernen Schachtofen erfolgen, zuerst die Koksschicht, dann die Oxydschicht, beides abwechselnd in horizontal übereinander liegenden Schichten, und in hinreichend grober Körnung, um den aufsteigenden Gasen keine zu grossen Hindernisse in den Weg zu setzen. Die Mischung der Beschickung erfolgt während des Niederganges.

II. Die Lichtbogen-Erhitzung.

Trotzdem mit dem Bekanntwerden der Voltaschen Säule im Jahre 1800 die Mittel gegeben waren, die Erscheinung hervorzurufen, welche man heute als Lichtbogen zu bezeichnen gewohnt ist, scheint doch Davy der erste gewesen zu sein, den konstanten Lichtbogen erkannt und den Bedingungen zu seiner Bildung nachgeforscht zu haben. Er konnte seine diesbezüglichen Untersuchungen im Jahre 1808 beginnen, als ihm eine Volta-Batterie von 2000 Elementen zur Verfügung gestellt worden war. Aber noch fast ein halbes Jahrhundert musste vergehen, bis über die ersten Versuche zur Nutz-

barmachung der intensiven Lichtbogenwärme für metallurgische Zwecke Berichte an die Öffentlichkeit gelangten.

Wer mit einem durch Lichtbogen geheizten Ofen zu arbeiten hat, sei es zu Versuchszwecken, sei es im Grossbetriebe der Technik, wird mit den neueren Arbeiten über das Wesen des Lichtbogens und die Bedingungen seiner Entstehung und Erhaltung vertraut sein. Die Abhandlungen von Prof. Sylvanus P. Thompson (Journal of the Society of Arts, 1895, Bd. XLIII), deutsch von Postrat Th. Karras (Zeitschr. f. Elektochemie, 1896, S. 525, 545, 570, 591), von Prof. Ayrton und Frau (Electrician, London, 1895) und von Prof. Voit (Sammlung elektrotechnischer Vorträge, Bd. I, Heft 1, Stuttgart 1896) fassen die Geschichte und die bisher bekannten Forschungsergebnisse über den Lichtbogen so kurz zusammen, dass ich von dem Versuche eines noch kürzeren Referates über diesen Gegenstand absehen und mich zunächst mit einem Hinweise auf diese Arbeiten begnügen darf. Die Vorschläge zur Verwertung der Lichtbogenwärme waren in ihren charakteristischen Typen folgende:

1. Öfen, in denen die zu erhitzende Substanz einen oder beide Pole eines Lichtbogens bildet.

Wohl als Vorversuch für seine Untersuchungen über die Wirkung hoher Wärmegrade auf Diamanten prüfte Depretz im Jahre 1849 das Verhalten einer aus Zuckerkohle hergestellten kleinen Retorte (15 mm Durchmesser) bei der Temperatur des Lichtbogens, den er im Innern dieser Retorte auf einen spitzen Kohlenstab überspringen liess. Die Retorte selbst bildete dabei den positiven Pol. Aus der Zuckerkohle war an den dem Lichtbogen am meisten ausgesetzten Stellen Graphit geworden (Comptes rendus, 1849, Bd. XXIX).

Bei den damals vorhandenen Stromquellen konnte sich dieses Erhitzungsprinzip begreiflicherweise in einer

für die Technik erspriesslichen Weise nicht weiter entwickeln, so dass wir uns nicht wundern dürfen, wenn erst die Jahre 1878 und 1879 neue, nun aber schon sehr vollkommene kleine Öfen bringen. Es sind dies die Konstruktionen von Ch. W. Siemens, welche zum Teil in den englischen Patentschriften Nr. 4208 von 1878 und Nr. 2110 von 1879, zum Teil in einer Mitteilung an die Elektrotechnische Zeitschrift vom Jahre 1880 beschrieben wurden. Die zu dieser Klasse gehörigen Öfen besassen folgende Einrichtung:

Durch den Boden des mit einer Metallhülle versehenen Tiegels war ein Pol bis in das Innere der letzteren geführt, so dass das mit einer Spitze aus Platin oder anderer widerstandsfähiger, die Schmelze nicht verunreinigender Masse geschützte Polende mit dem Schmelzgut in direkte Berührung kam. Der andere, durch den Deckel in den Schmelzraum eingelassene Pol bestand aus einem Metallhohlkörper, welcher, wie Fig. 21 zeigt, durch Wasser oder andere Flüssigkeiten gekühlt werden konnte.

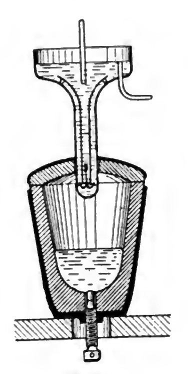


Fig. 21.

Später wurden die Pole insofern gewechselt, als, wie aus Fig. 22 ersichtlich, der gekühlte Pol in den Tiegelboden verlegt wurde, während der durch den Deckel eingehängte Pol aus Kohle bestand. Stets bildete das zu schmelzende Material, das ja bei Benutzung dieser Ofenformen leitfähig sein musste, den positiven Pol.

Auf einen wichtigen Punkt aus den Siemens'schen Patentschriften muss ich hier noch besonders hinweisen, da er in den meisten Berichten über diese Öfen über-

sehen worden ist, nämlich auf den Versuch, den Lichtbogen elektromagnetisch an einen bestimmten Ort zu fesseln. In der englischen Patentschrift Nr. 2110 von 1879 wird nämlich empfohlen, den Tiegel mit

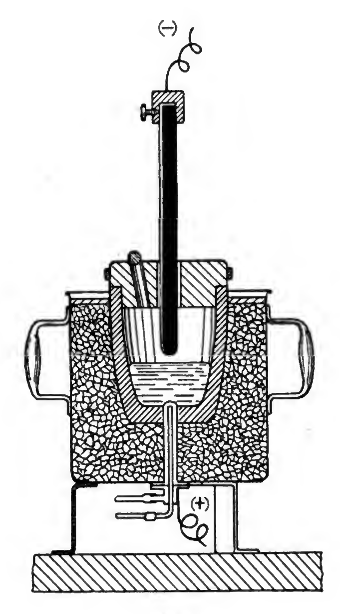


Fig. 22.

einem von einem Strome durchflossenen Drahtsolenoide zu umgeben, um der Neigung des Lichtbogens, zu den Tiegelwänden überzuspringen, entgegenzuwirken. Auf Tiegelöfen, in denen lediglich dieses Prinzip in einigen zum Teil recht unpraktischen Konstruktionen zur Ausführung gebracht wird, haben

unbegreiflicherweise während der letzten Jahre Girard und Street in fast allen Ländern Patente erhalten.

Einen anderen ebenfalls in den genannten Patenten beschriebenen Ofen von Siemens müssen wir mit der zweiten Gruppe der Lichtbogenöfen besprechen.

Die Entwicklung der Calciumcarbid-Industrie hat begreiflicherweise auch die Entwicklung des Lichtbogenschmelzofens nicht unwesentlich gefördert, obwohl zur Reduktion des Kalks die Temperatur des Lichtbogens durchaus nicht erforderlich ist (vergl. S. 30). In den einfacheren Formen dieser Öfen werden wir allerdings nur wenig veränderte Siemens-Tiegel wiedererkennen, die ja auch leicht für den Grossbetrieb passend gemacht werden konnten.

Hierher gehören zunächst die Öfen der Willson Aluminium Company zu Spray, N. C. Anfangs zur Aluminiumfabrikation bestimmt, wurden dieselben schliesslich zur Carbidfabrikation benutzt.

In das mit Beschickungsvorrichtungen, Gas- und Flugstaubkanälen versehene Mauerwerk wird der eiserne Schmelztiegel eingefahren. Letzterer ist im Boden mit 50 mm dicken Kohleplatten ausgelegt und bildet so einen der Lichtbogenpole. Zum Schutze der Seitenwände genügt der unzersetzt bleibende Teil der Beschickung. Die andere Elektrode besteht aus 100 mm dicken und 915 mm langen Kohleplatten, von denen 6 Stück zu einem Blocke von 915 mm Länge, 300 mm Breite und 200 mm Dicke durch einen Teer-Kokspulver-Kitt zusammengesetzt sind. Diese Blöcke werden von einer auf und ab beweglichen eisernen Klammer gehalten.

Man nähert nun den oberen Pol dem Tiegelboden und füllt die Tiegel mit der an sich nicht leitenden Beschickung. Der durch einen Wechselstrom erzeugte Lichtbogen schmilzt die Masse, welche sich zu Carbid umsetzt und nun den Strom leitet, so dass der von der allmählich

zu hebenden oberen Elektrode ausgehende Lichtbogen zu der Schmelze überspringen kann. Nach etwa drei- bis fünfstündigem Betriebe hat sich genug Calciumcarbid

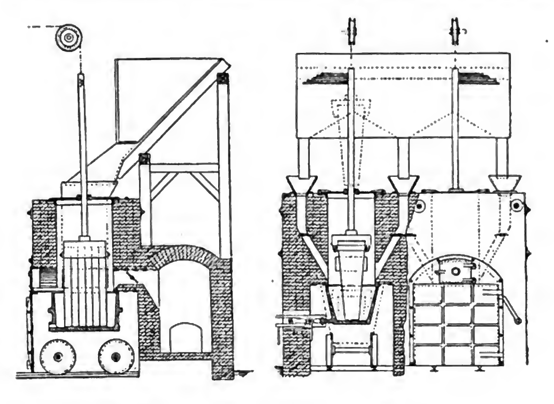


Fig. 23. Fig. 24.

angesammelt; der Strom wird nun unterbrochen; den Ofen lässt man etwa eine Stunde lang kühlen und entfernt dann das Carbid.

In Tenner's Ofen (D. R. P. Nr. 88364) ruht der aus einer Eisenplatte *a* und einer leitenden Kohleplatte *k* bestehende Herd auf einem fahrbaren Gestelle *A*, mit Hilfe dessen er in den mit einer Fallthür *D* versehenen Ofenschacht eingefahren, bezw. aus demselben ausgezogen werden kann. Wenn die Eisenplatte *a* mit den stromzuführenden Kabeln *p* eines Dynamopoles verbunden ist, stellt sie in Gemeinschaft mit der Koksdecke *k* zugleich die eine Elektrode des Ofens dar. Nachdem man die oberen Elektroden *b*, welche mittels des Kabels *q* an den anderen Pol der Dynamo angeschlossen sind, dem Boden so weit genähert hat, dass ein Lichtbogen überspringt und sich

dadurch der Ofen hinreichend stark erwärmt hat, wird er von *c* aus beschickt. Durch *d* entweichen die Reaktionsgase. Ist genug eingeschmolzen, so lässt man abkühlen und zieht dann den Wagen mit der erstarrten Schmelze

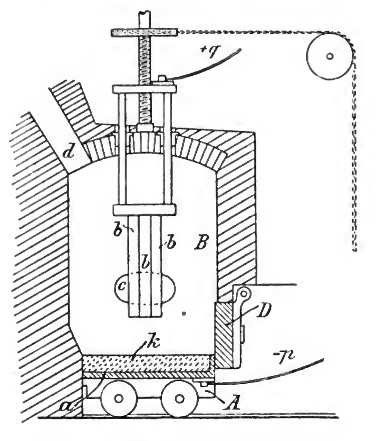


Fig. 25.

aus dem Ofen. Der Herd wird abgeräumt und ist dann wieder zum Betriebe fertig.

Nach ganz ähnlichen Grundsätzen arbeitet ein kürzlich in Éclairage électrique (1896, Bd. 8, S. 504) und in der Zeitschrift für Elektrochemie (1896/97, Bd. III, S. 225) beschriebener Ofen von Bullier, auf den wir hier nicht näher einzugehen brauchen.

Um den Lichtbogen tief innerhalb des einzuschmelzenden Materials zu erzeugen, und so die durch Ausstrahlung entstehenden Wärmeverluste zu vermeiden, gleichzeitig auch den sich entwickelnden Gasen einen möglichst ungehinderten Ausweg aus dem Schmelztiegel zu ver-



schaffen, haben Thwaite und Allen eine Reihe recht brauchbarer Konstruktionen angegeben, von welchen eine Form in Fig. 26 dargestellt ist. Das einzuschmelzende Metall, bezw. eine andere leitfähige Substanz, bildet, wie in dem Siemens'schen Tiegel, einen Pol des Lichtbogens. Der zweite Pol, auch wie üblich, ein Kohlepol, wird durch ein aus nicht leitendem Material hergestelltes weites Rohr umgeben. In den Zwischenraum zwischen diesem

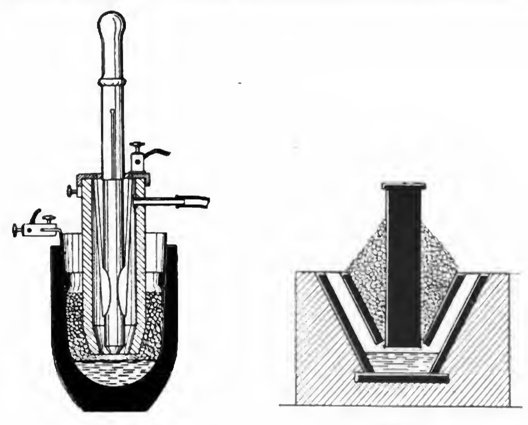


Fig. 26. Fig. 27.

Rohre und der Tiegelwand wird die Beschickung aufgegeben. Die Verbindung der Pole mit der Stromleitung ist aus der Abbildung deutlich genug ersichtlich.

In einer anderen Ausführungsform desselben Prinzipes dient das mittlere Rohr zur Einführung der Beschickung. Statt eines Kohlepoles ist dann eine grössere Anzahl von Kohlestäben ringförmig um das Centralrohr angeordnet, so dass der freie Raum da entsteht, wo in Fig. 26 die Beschickung angedeutet ist. Eine Wiedergabe der Abbildung dieser zweiten Schmelzvorrichtung

ist wohl überflüssig: ich verweise auf die Patentschrift (Engl. Patent Nr. 21879 von 1894) und auf ein mit allen Abbildungen versehenes Referat in der Zeitschrift für Elektrochemie (1895/96, II. S. 453).

Auch eine von Rathenau angegebene Konstruktion, Fig. 27, soll das Aufwirbeln und Wegblasen der Beschickung und besonders das Verbrennen der von oben in den Schmelzraum eingeführten Kohleelektroden verhüten. Abweichend von dem soeben beschriebenen Tiegel von Thwaite und Allen, liegt hier die Beschickung gerade mit der betr. Kohleelektrode in einem Raume, während die Abgase durch die Zwischenräume zwischen dem aus Kohleplatten gebildeten Beschickungstrichter und den schrägen Ofenwandungen entweichen. Die zur Herstellung von Calciumcarbid bestimmte Beschickung ist in diesem Falle allerdings fast nicht leitend; die Lichtbogenbildung wird durch dieselbe also nicht gestört. Dadurch aber, dass der Kohlepol fast vollständig in die aus Kalk und Kohle bestehende Beschickung eingepackt wird, ist er so gut vor dem Zutritte der Luft geschützt, dass sein Abbrand gegenüber anderen Öfen mit frei liegendem Pole ganz wesentlich vermindert werden muss.

Die Rathenau'sche Konstruktion könnte man als ersten Schritt zum Bau eines elektrischen Hochofens mit Lichtbogenheizung ansehen, wenn der Ausführung eines solchen Projektes nicht gar zu grosse Schwierigkeiten im Wege ständen. Für die Widerstandserhitzung wurde ja diese Möglichkeit erörtert; dort liegen die Verhältnisse in der That günstiger. Hier aber brauche ich nur auf die aus einer Patentschrift von Heibling entnommene Abbildung eines zum Erschmelzen von Mangan-, Chrom-, Aluminium- und Nickeleisenlegierungen vorgeschlagenen Schachtofens hinzuweisen, um aller längerer Auseinandersetzungen überhoben zu sein. Man stelle sich nur die mit der Herstellung und Handhabung der in der Mitte des in

Fig. 28 dargestellten Ofens angeordneten Kohlestäbe vor, wenn auch der Schacht nur wenige Meter tief ist!

Noch mögen zwei für Versuchszwecke bestimmte Apparate Erwähnung finden, die sich mit geringen Mitteln beschaffen und von etwa vorhandenen Beleuchtungsanlagen selbst geringer Stromstärken betreiben lassen.

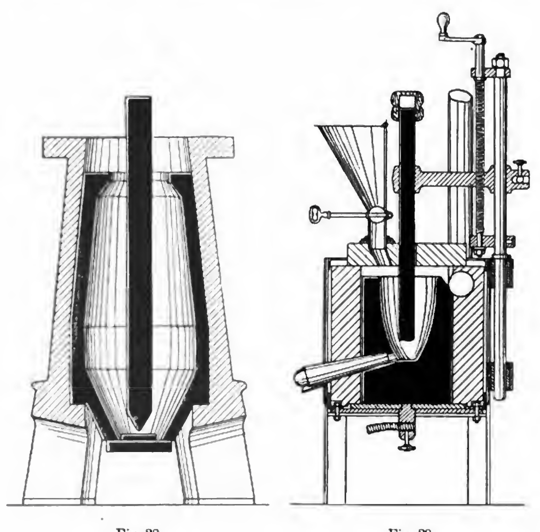


Fig. 28. Fig. 29.

Der eine dieser Öfen ist der aus zahlreichen Veröffentlichungen bekannte, von der deutschen Gold- und Silberscheideanstalt vorm. Rössler, gelieferte, in Fig. 29 dargestellte Schmelzofen, dessen Einrichtung aus der Abbildung ohne weiteres verständlich sein wird.

Den andren, in Fig. 30 und 31 abgebildeten Ofen habe ich für das Laboratorium der königlichen Hütten-

schule zu Duisburg konstruiert. In das obere Ende eines langen, dicken Kohlestabes ist die Tiegelhöhlung ausgedreht. Das untere Ende dieses Kohlestabes wird in einen

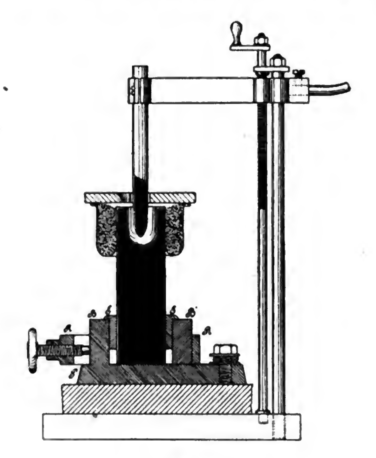


Fig. 30.

Halter eingesetzt, der zugleich die Verbindung mit der Stromleitung vermittelt. Der Halter besteht aus einer Bodenplatte *P*, einem mit dieser vergossenen feststehenden

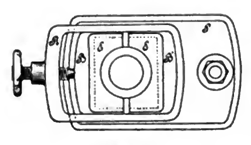


Fig. 31.

Backen *B* und einem lose aufgesetzten Backen *B'*. Letzterer kann durch den mit einer Schraube versehenen Ring *R* fest gegen ersteren angezogen werden. Ist man

gezwungen, verschiedene Tiegelgrössen zu benutzen, so werden zwischen die den Tiegel festklemmenden Backen Einsätze *E* eingehängt, von denen man für jede Tiegelgrösse ein Paar vorrätig halten muss. Um bei Schmelzversuchen ein Abbrennen der Kohle in der Gegend der Schmelzzone zu verhüten, wird über den oberen Tiegelrand eine Blechhülse geschoben, welche mit Holzkohlenpulver zu füllen ist. Alle übrigen Teile der Skizze bedürfen keiner Erklärung.

Slavianoff's Schmelztiegel (Figur 32) endlich weicht insofern von der in allen den eben erörterten Fällen einge-

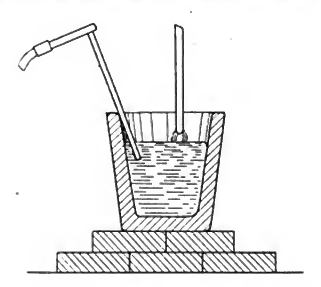


Fig. 32.

schlagenen Arbeitsweise ab, als beide Lichtbogenpole von dem einzuschmelzenden Materiale gebildet werden. Das zu verflüssigende Metall wird in Stabform als oberer Pol angeordnet, während die Schmelze selbst den negativen Pol bildet. Für Giessereizwecke oder für die Metallraffination wird die bei den anderen Apparaten unvermeidliche Aufnahme von Kohlenstoff seitens des einzuschmelzenden Metalles vollständig umgangen. Dass infolge Abtropfens des Metalles von der oberen Elektrode für die Aufrechterhaltung des Lichtbogens einige Schwierigkeiten entstehen, ist klar. Slavianoff hat dieselben aber durch eine empfindliche Reguliervorrichtung beseitigt.

Der Gedanke, die Lichtbogenpole aus der für den Ofen bestimmten Beschickung herzustellen, ist übrigens schon in älteren Veröffentlichungen zum Ausdruck gekommen. Gerard-Lescuyer (s. Figur 33 nach D. R. P. Nr. 48040) wollte z. B. Aluminiumbronze in der Weise herstellen, dass er aus Aluminium, Kohle und Kupfer Stäbe formte und zwischen diesen den Lichtbogen überspringen liess. Das abtropfende Metall sollte sich auf dem Herde eines Flammofens sammeln, der durch eine

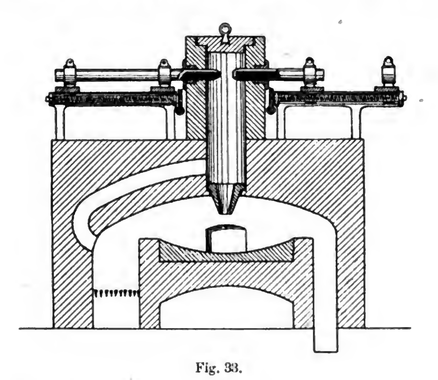


Fig. 33.

kleine Feuerung, in welcher auch das bei dem Reduktionsprozesse entstehende Kohlenoxyd verbrannt wurde, warm gehalten wurde. Wenn dieser Apparat überhaupt brauchbar sein sollte, so war er es auf keinen Fall für die Herstellung einer Legierung, deren beide Bestandteile bei der Temperatur des Lichtbogens äusserst leicht flüchtig sind.

Dass sich schliesslich jeder elektrische Schmelzofen in einem Behälter unterbringen lässt, in welchem man eine den Schmelzprozess beeinflussende oder nicht beeinflussende Atmosphäre aufrecht erhalten kann, unterliegt wohl keinem Zweifel. Dieser Zweck lässt sich aber in

den meisten Fällen auf einfachere Weise erreichen, wie mit den patentierten Vorrichtungen von Menges, D. R. P. Nr. 40354 (1886) und Taussig, D. R. P. Nr. 52650 (1889).

2. Öfen, in denen sich die zu erhitzende Substanz in einem durch Lichtbogen erhitzten Raume befindet.

Nur wenige Jahre nach der Veröffentlichung von Depretz wurde ein englischen Patent, betreffend „ein Schmelzverfahren für Eisen- und andere Erze", Nr. 700 von 1853 unter dem Namen Johnson angemeldet, das

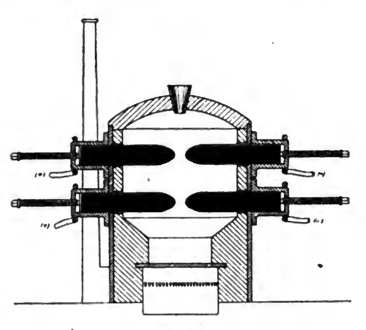


Fig. 34.

bei dem damaligen Stande der Elektrotechnik natürlich nicht die geringste Aussicht auf Verwendung haben konnte. Nach einer späteren Veröffentlichung von Andreoli zu schliessen, war der Erfinder dieses Verfahrens und Apparates ein Franzose, namens Pichou (vielleicht war Johnson der englische Patentanwalt von Pichou). „Das zu schmelzende Erz oder Metall", sagt die Patentschrift, „lässt man zwischen grossen Elektrodenpaaren herabfallen, welche in bekannter Weise in den Stromkreis einer galvanischen Batterie eingeschaltet sind." In einem unter den Polen

angeordneten, heizbaren Sammelraum sollte den im Lichtbogen geschmolzenen Massen Zeit gelassen werden, sich ihren spezifischen Gewichten nach zu scheiden. (Fig. 34.)

Eine in derselben Patentschrift angegebene Modifikation dieser Schmelzvorrichtung bestand darin, dass zwei Elektroden unter einem Winkel zu einander angeordnet waren. Durch die höher liegende hohle Elektrode sollte die Beschickung in den Lichtbogen eingeführt werden. Das Erz sollte innerhalb dieser Elektrode durch eine Transportschnecke vorgeschoben werden. Auch zum Vorschieben der allmählich abbrennenden Elektroden waren Schraubvorrichtungen vorgesehen.

Der Erfinder war, wie man sieht, seiner Zeit weit, weit voraus, denn das Zeitalter der galvanischen Elemente konnte seine kühnen Pläne leider nicht verwirklichen. Bemerkenswert ist es jedenfalls, dass H. Cowles im Jahre 1887 noch einen Ofen patentiert erhielt, welcher dieser Beschreibung fast genau entspricht (Engl. Patent Nr. 4664 von 1887).

Ch. W. Siemens hatte in den erwähnten Patenten auch einen Schmelztiegel für elektrisch nicht leitfähiges Material

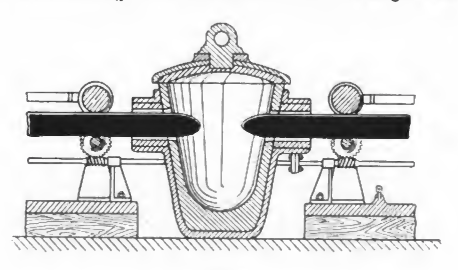


Fig. 35.

angegeben, auf den wir oben schon kurz hingewiesen haben; thatsächlich ist dieser Tiegel der erste wirklich

zur praktischen Ausführung gekommene Ofen dieses Erhitzungsprinzipes, wenn er auch erst im Jahre 1879 öffentlich bekannt wurde. Die Elektroden sind wie bei Pichous Ofen durch die Seitenwände des Schmelzgefässes hindurchgeführt und lassen sich auch in dem Masse wie sie abbrennen durch Schneckengetriebe vorschieben. Rufen wir uns nun noch einmal die Hauptpunkte der Siemensschen Patentschriften ins Gedächtnis zurück, so kann kein Zweifel darüber herrschen, dass Ch. W. Siemens schon vor fast zwanzig Jahren alle wesentlichen Konstruktionsbedingungen für die mit dem Lichtbogen arbeitenden elektrischen Öfen erkannt und ausgesprochen hat. Er hatte Öfen konstruiert, in denen

1. die zu schmelzende Substanz als Pol eines Lichtbogens fungierte, oder
2. unabhängig von den Elektroden in einem durch Lichtbogen geheizten Raume erhitzt wurde; er hatte
3. kühlbare Elektroden vorgeschlagen und angewandt, und hat
4. die Richtung des Lichtbogens durch Elektromagnete in einer zur Wärmeausnutzung günstigen Weise zu beeinflussen verstanden.

Alle die nun folgenden Konstruktionen, so praktisch dieselben auch zum Teil veranlagt sind, stehen ohne Ausnahme auf dem Boden der Siemens'schen Erfindung. In einigen derselben können wir thatsächlich nur veränderte Formen der einfachen, aber in jeder Beziehung gut ausgedachten Mustertiegel von Siemens wiedererkennen. Ich kann mich daher darauf beschränken, an der Hand der folgenden Abbildungen kurz auf die in den besseren Konstruktionen der letzten Jahre vorgenommenen Abänderungen der Siemens-Öfen hinzuweisen:

Ofen von Rogerson, Statter und Stevenson, D. R. P. Nr. 42 022, 1887, Fig. 36 und 37, hat statt des

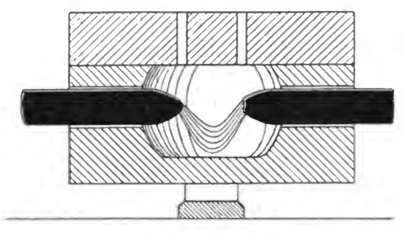


Fig. 36.

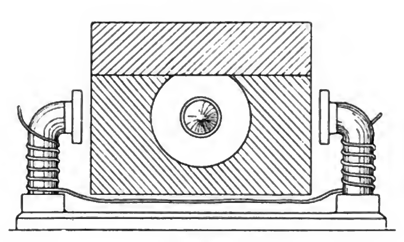


Fig. 37.

Siemens'schen Solenoides einen Hufeisen-Elektromagneten zur Ablenkung des Lichtbogens auf die Herdsohle des Schmelzofens erhalten.

Ofen von Lejeune und Ducretet, Fig. 38: Schräggestellte Elektroden, der Schmelztiegel steht in einem grösseren Heizraume, welchem durch einen seitlichen Rohrstutzen beliebige Gase zugeführt werden können; die Vorder- und die Rückwand des Ofens besteht je aus einer Glimmerplatte, so dass der Schmelzprozess beobachtet werden kann; ein zur Einlenkung des Lichtbogens in den Tiegel bestimmter Elektromagnet soll auf den Arbeitstisch in die

Nähe des Ofens gelegt werden. Dieser äusserst brauchbare Ofen wird in Deutschland von der deutschen Gold- und Silberscheideanstalt in Frankfurt a. M. geliefert.

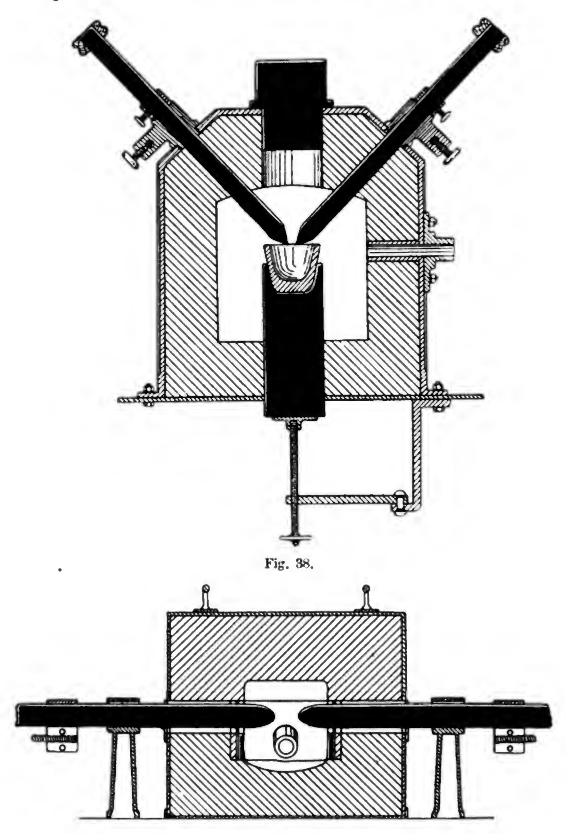


Fig. 38.

Fig. 39.

Ofen von Moissan aus den Jahren 1893/4, Fig. 39 und 40: Das zu schmelzende Material wird durch ein Kohlerohr in den aus Kalkstein hergestellten Schmelzraum eingeführt.

Moissan-Chaplet-Ofen aus dem Jahre 1894, Fig. 41: Zuführung der Beschickung wie bisher; das bezw. die Beschickungsrohre werden von mehreren in dem Schmelz-

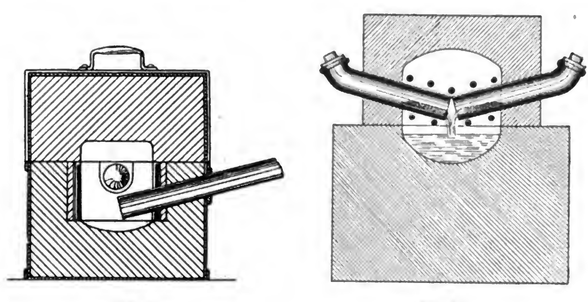


Fig. 40. Fig. 41.

raume verteilten Lichtbogen geheizt; der obere (Elektroden-) Teil des Ofens kann über einen andern Schmelzherd geschoben werden.

Endlich darf Zereners Schmelzvorrichtung nicht unerwähnt bleiben, selbst wenn sie ursprünglich nur für die Metallbearbeitung, z. B. zum Löten, Schweissen bestimmt war. Sie ist aber geeignet, im elektrometallurgischen Laboratorium das Lötrohr da zu ersetzen, wo die Gasflamme nicht mehr ausreicht. Zerener lenkt den zwischen zwei schräg gestellten Elektroden hervorgerufenen Lichtbogen durch Elektromagnete nach unten ab. Dadurch, dass er Elektroden und Elektromagnete in leicht zu handhabenden Gestellen so anordnet, dass sich der ganze Mechanismus mit der Hand oder, bei den grösseren

Apparaten, mit Hilfe von Laufrollen leicht führen lässt, ist ein wirklich sehr praktischer Apparat entstanden. Fig. 42

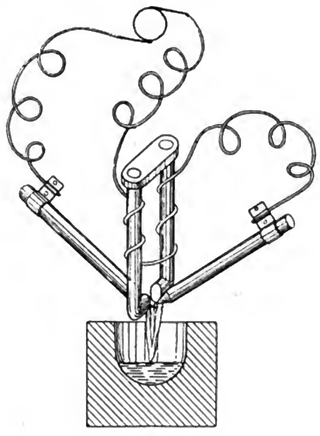


Fig. 42.

giebt nur eine schematische Darstellung der wesentlichen Apparatteile.

Die Bildung und Erhaltung eines Lichtbogens hängt ausser von der verfügbaren elektromotorischen Kraft und Stromstärke ganz wesentlich auch von der Natur des Elektrodenmateriales ab. Elektroden aus leitfähiger Kohle eignen sich bekanntlich am besten für diesen Zweck und finden ja auch in der Beleuchtungstechnik ausschliesslich Verwendung. In der metallurgischen Technik haben wir aber, wie die vorhergegangenen Erörterungen zeigten, auch damit zu rechnen, dass Metalle als Pole mitzuwirken haben, und dass die Gegenwart einiger Metalle die Bildung eines Lichtbogens bezw. dessen Aufrechterhaltung ausschliesst. Diese Metalle sind Zink und Wismut, auch das

von dem Metallurgen meist in der Liste der Metalle geführte Antimon. Immerhin ist zu berücksichtigen, dass von der absoluten Unmöglichkeit der Bildung eines Lichtbogens in diesen Fällen auch nur dann die Rede sein kann, wenn wenigstens der positive oder beide Pole aus einem dieser Metalle, bezw. aus Legierungen bestehen, in denen diese Metalle vorherrschen; mit einem positiven Pole aus anderen Metallen oder Kohle ist ein Lichtbogen, wenn auch unsicher, so doch nicht unmöglich. Ich habe aus Antimon-, Wismut- und Zinklegierungen im Lichtbogen diese drei Metalle abgetrieben, wenn ich die betreffende Legierung als Kathode benutzte; während der Lichtbogen nur äusserst schwierig länger als kurze Augenblicke aufrecht zu erhalten war, wenn solche Legierungen als Anoden fungierten. Die Fälle, in denen man Legierungen dieser Art im elektrischen Ofen zu verarbeiten hat, sind zwar seltene, können aber doch noch eine grössere Bedeutung gewinnen, da wo es sich um die Herstellung sehr reiner Metalle oder Metalloide aus schwer reduzierbaren oder sonstwie widerspenstigen Rohstoffen handelt. Schon in der ersten Auflage meiner Elektrometallurgie empfahl ich, schwer reduzierbaren Mischungen „leicht schmelzbare und leicht flüchtige Metalle wie Zink und andere oder deren Oxyde mit Kohle gemischt zuzusetzen, oder auch die Kohle ganz durch ein derartiges stark elektropositives Metall zu ersetzen. Es wird dadurch im ersten Augenblicke ein Zusammenschmelzen der Mischung und wenn das zugesetzte Metall stark elektropositiven Charakters ist, auch die beabsichtigte Reduktion wesentlich gefördert."

Über die zur Bildung eines Lichtbogens zwischen Kohlepolen innezuhaltenden Bedingungen liegen aus der Beleuchtungstechnik schon weitgehende Erfahrungen vor Sie finden sich in den umstehenden Tabellen zusammengestellt. Bei Angabe der Kohlenpoldimensionen habe ich

natürlich nur auf durchweg massive Stäbe oder Platten, also Homogenkohlen, Rücksicht genommen, Kohlen mit lockeren Kernen, die sogenannten Dochtkohlen, wie sie in Bogenlampen der besseren Lichtwirkung wegen Verwendung finden, bieten im elektrischen Schmelzofen keinerlei Vorteile.

E. M. K.	Strom-stärke	Kohlenquerschnitt		Licht-bogen-länge	Energie-verbrauch
		im ganzen	per Ampère		
Volt	Ampère	qmm	qmm	mm	Watt
39	5,0	38	7,6	3,0	195
46	8,6	95	11	3,0	395
49	12,3	165	13	3,5	602
49	11,1	165	14	4,1	543
47	13,1	111	8	5,1	615
48	18,1	203	11	5,5	868
48,5	20,0	203	10	7,0	970
49	21,8	203	9	7,5	1068

Die Grundlage für die vorstehende Tabelle sind dem offiziellen Berichte der elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt a. M. (1891) über die von der Prüfungskommission ausgeführten Messungen entnommen. Sie zeigen, dass die Lichtbogenlänge, nachdem die zur Aufrechterhaltung des Bogens erforderliche elektromotorische Kraft erreicht ist, ganz wesentlich von der verfügbaren Stromstärke abhängt. Ganz besonders klar geht dies auch aus den Ergebnissen einer Versuchsreihe hervor, welche die Chicagoer Feuerversicherungs-Gesellschaften mit Rücksicht auf die Feuergefährlichkeit von Stromleitungen mit Spannungen von 500 Volt hat anstellen lassen (siehe nebenstehende Tabelle).

Über die Temperatur des Lichtbogens hat man bis vor kurzem viel hin und her geraten; erst in den letzten Jahren ist dieselbe für Kohleelektroden mit einiger Sicherheit von Violle und von Gray bestimmt worden, so dass wir die Temperatur des positiven Kraters zu etwa

Stromstärke in Ampère	Höchste Entfernung der Pole beim Überspringen	Geringste Entfernung der Pole, bei welcher beim Öffnen des Stromkreises kein Lichtbogen entstand	Länge des dauernden Lichtbogens
10	6 mm	6 mm	25 mm
20	12 „	18 „	51 „
30	30 „	51 „	68 „
40	51 „	57 „	81 „
50	57 „	64 „	90 „
60	77 „	82 „	94 „
70	77 „	86 „	102 „
80	86 „	91 „	104 „
90	90 „	97 „	112 „
100	96 „	102 „	114 „

3500° annehmen können, während die Temperatur der Kathode wesentlich niedriger liegt, nämlich bei etwa 270°; die Temperatur des Lichtbogens selbst ist noch höher wie die der Anode, sie liegt zwischen 3500° und 4000°. Bei 3500° und gewöhnlichem Atmosphärendruck verflüchtigt sich der Kohlenstoff, ohne zu schmelzen, die Temperatur des Lichtbogens kann daher an der Anode nicht gut über 3500° steigen. Dass ein zwischen zwei Metallen bezw. einer Metallanode und einer beliebigen Kathode hervorgerufener Lichtbogen kälter sein muss, als ein Kohlenstoff-Lichtbogen, bedarf mit Rücksicht darauf, das die Siedepunkte der Metalle niedriger liegen als der Verflüchtigungspunkt des Kohlenstoffes, keiner Bestätigung.

Zwischen den Lichtbogenelektroden spielen sich Vorgänge ab, welche wir wohl als elektrolytische zu bezeichnen berechtigt sind, denn selbst von den widerstandsfähigsten Kohlenanoden gehen beträchtliche Mengen Kohlenstoff zur Kathode über. Platin, Eisen, Chrom und verwandte Metalle kann man in einem Lichtbogen mit

Kohlenanoden nicht schmelzen, ohne sie in kürzester Zeit stark durch Kohlenstoff zu verunreinigen.

Die den Lichtbogen umgebenden Gase, ihre Beständigkeit in hohen Temperaturen vorausgesetzt, beeinflussen nach S. P. Thompsons Untersuchungen die Länge des ersteren, und die zu seiner Erzeugung erforderliche elektromotorische Kraft bei normalem Drucke fast gar nicht. Je dünner aber die umgebende Gasatmosphäre, desto grösser die Länge, auf welche sich der Lichtbogen ausziehen lässt. Dass die Bestandteile der umgebenden Gase chemisch auf die Polsubstanz einwirken, also an etwaigen elektrolytischen Vorgängen teilnehmen, ist selbstverständlich. So sind bei der Benutzung von Kohleelektroden und Luft als umgebendem Gase ausser Kohlenoxyd und Kohlensäure selbst Stickstoffverbindungen in den Lichtbogengasen nachgewiesen. Von wesentlichem Einflusse auf die Art der im Lichtbogen sich abspielenden chemischen Vorgänge und der dort entstehenden Produkte ist natürlich die Spannungsdifferenz zwischen den Polen. In einem Lichtbogen von hoher Spannung sollen sich unter den eben angegebenen Bedingungen z. B. mehr Stickstoffverbindungen bilden als in einem Lichtbogen von niedriger Spannung.

Sogenannte Beruhigungswiderstände, wie beim Bogenlampenbetriebe, in die Stromleitung einem der Pole vorzuschalten, hat nur dann Zweck, wenn die verfügbare Spannung höher ist als der gewünschte Lichtbogen erfordert. Die Regelung der Polstellung geschieht ja bei elektrischen Schmelzöfen meist mit einfacheren Hilfsmitteln als sie die Beleuchtungstechnik erfordert; es braucht ja auch im Schmelzofenbetriebe die Ruhe des Lichtbogens keine so grosse zu sein wie in der Bogenlampe, obwohl mit Rücksicht auf die Haltbarkeit der Stromquelle häufige grobe Störungen möglichst zu vermeiden sind.

Um endlich noch auf das Baumaterial für den Lichtbogenofen einzugehen, so geniessen wir hier dieselben

Freiheiten wie bei den Widerstandsöfen; denn es steht uns nichts im Wege, hier wie dort durch Verwendung kühlbarer Metallgefässe auch minder feuerbeständiges Baumaterial, das mit Rücksicht auf die Reinerhaltung der Schmelzprodukte besonders geeignet erscheint, in genügend starken Lagen auf den Gefässwandungen oder auf anderen der Abnutzung mehr ausgesetzten Apparatteilen festhaftend anzubringen.

Es bliebe nun noch die Frage zu beantworten übrig: Wo ist die Widerstandserhitzung und wo die Lichtbogenerhitzung am Platze?

Ohne Zweifel liegt die obere Grenze der Technik der Erzeugung hoher Wärmegrade bei der Temperatur des Lichtbogens. Bedarf es also wirklich einer in der Nähe von 3000 liegender Temperatur zur Durchführung eines chemischen Prozesses, dann ist in erster Linie zu berücksichtigen, dass der direkte Wirkungskreis dieser Wärmequelle auf einen sehr kleinen Raum beschränkt ist. Ich verweise auf die erstere der beiden zuletzt angeführten Tabellen bezüglich der Länge und des Energieverbrauches eines Lichtbogens. Will man also einen grösseren Raum unter Ausnutzung des Wärmespeicherungsvermögens von Ofenbaumaterial und Schmelzgut durch Wärmestrahlung heizen, so ist es klar, dass man mit wesentlich niedrigeren Temperaturen zu rechnen haben wird. Nun, glücklicherweise ist, wie schon früher ausgeführt wurde, bei weitem nicht die im Lichtbogen wirklich herrschende Temperatur zur Durchführung selbst des schwierigsten Prozesses nötig. Mit dem Lichtbogen wird man sich daher immer abfinden müssen, wenn man bei hohen Temperaturen von fremdartigem Elektrodenmaterial, besonders also vom Kohlenstoff, und von der Leitfähigkeit der Beschickung und ihrer Umsetzungsprodukte unabhängig sein will. Ist aber das zu erhitzende Material leitfähig, und soll es der besseren Wärmeausnutzung

wegen als Lichtbogenpol mitwirken, so ist wohl zu beachten, dass sowohl in der Schmelze, wie in der Gaszone des Lichtbogens selbst elektrolytische Vorgänge nie ausgeschlossen sind. Sehr enge Grenzen sind mit Rücksicht auf die Schwierigkeiten in der Herstellung grosser Kohleelektroden für die Dimensionen der auszuführenden Öfen gezogen.

Ist das Schmelzgut oder sind Teile desselben leitfähig oder ist den zu erschmelzenden Produkten die Berührung mit kohlenstoffhaltigen Widerständen nachteilig, so hat man entschieden die Wärmeverteilung und die Regelung der Temperatur bei der Verwendung von Erhitzungswiderständen viel besser in der Hand wie mit dem Lichtbogen als Wärmequelle. Räumliche Beschränkungen endlich stehen der Ausführung von Widerstandserhitzungsapparaten nicht mehr im Wege als jedem andern, von der natürlichen Festigkeit der Materialien abhängigen Bauwerke.

Register.



Halle a. S., Buchdruckerei des Waisenhauses.



